



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA**



FACTORES MINERO - GEOLÓGICOS EN LAS MACROZONAS NORTE Y CENTRO DE CHILE RELACIONADOS AL CONSUMO DE AGUA EN EL PROCESAMIENTO DE MINERALES DE COBRE

Memoria para optar al Título de Geólogo

Ignacio Ramón Huenupi Contreras

Profesor Patrocinante: Dr. Leopoldo Esteban Gutiérrez Briones
Profesores Comisión: Dra. Fernanda Carolina Álvarez Amado
Dr. Oscar Alfonso Jerez Riveros

Concepción, 2022

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo	2
1.1.1. Objetivos específicos.....	2
1.2. Metodología.....	2
1.2.1. Etapa de gabinete.....	2
1.3. Ubicación.....	2
1.4. Hidrografía, Clima y Orografía	3
1.4.1. Macrozona Norte	3
1.4.2. Macrozona Centro	4
1.5. Trabajos Anteriores.....	4
1.6. Agradecimientos	5
2. MARCO GEOLÓGICO	6
2.1. Franjas Metalogénicas.....	6
2.1.1. Franja Metalogénica del Cretácico Inferior.....	6
2.1.2. Franja Metalogénica del Paleoceno - Eoceno inferior	7
2.1.3. Franja Metalogénica del Eoceno superior - Oligoceno inferior	8
2.1.4. Franja Metalogénica del Neógeno.....	9
2.2. Cerro Colorado.....	10
2.2.1. Etapa de Alteración Temprana	10
2.2.2. Etapa de Alteración y Mineralización Principal.....	10
2.2.3. Etapa de Alteración y Mineralización Transicional	11
2.2.4. Etapa Tardía de Vetillas de Pirita.....	11
2.3. Rosario (Distrito Collahuasi).....	12
2.3.1. Alteración Propilítica (P).....	12
2.3.2. Alteración Potásica (B, K y FK).....	12
2.3.3. Alteración Cuarzo - Sericítica (QS y SQS)	12
2.3.4. Alteración Sericita Gris Verde (CS).....	13
2.3.5. Alteración Argílica y Argílica avanzada (A).....	13
2.3.6. Skarn (SK) y Hornfels (HNF)	13

2.4. Ujina (Distrito Collahuasi).....	14
2.4.1. Etapa Temprana de Alteración Potásica.....	14
2.4.2. Etapa Principal de Alteración.....	14
2.5. Quebrada Blanca.....	15
2.5.1. Alteración Potásica (FK, BIO y GM).....	16
2.5.2. Alteración Fílica (QS).....	16
2.5.3. Alteración Argílica (AR).....	16
2.5.4. Metamorfismo de Contacto (BIOMET).....	16
2.5.5. Alteración Propilítica.....	17
2.5.6. Alteración Supérgena.....	17
2.6. El Abra.....	18
2.6.1. Alteración Potásica.....	18
2.6.2. Alteración Fílica.....	19
2.6.3. Alteración Argílica Avanzada.....	19
2.6.4. Alteración Propilítica.....	19
2.6.5. Alteración Supérgena.....	19
2.7. Radomiro Tomic.....	20
2.7.1. Potásico de Fondo.....	21
2.7.2. Clorítico Marginal.....	21
2.7.3. Mica Oscura Temprana (<i>Early Dark Micaceous</i> , EDM).....	21
2.7.4. Sericita Gris Verde (SGV).....	22
2.7.5. Cuarzo - Sericita Penetrativa.....	22
2.7.6. Argílica Avanzada.....	22
2.7.7. Alteración Argílica.....	22
2.7.8. Alteración Supérgena.....	23
2.8. Chuquicamata.....	24
2.8.1. Pótasico de Fondo.....	25
2.8.2. Alteración Clorítica.....	25
2.8.3. Feldespato Potásico - Cuarzo de Grano Fino.....	25
2.8.4. Sericita Gris Verde Temprana.....	25
2.8.5. Eventos Tardíos de Cuarzo - Sericita con Asociaciones de Alta Pirita.....	26
2.8.6. Alteración Supérgena.....	26
2.9. Ministro Hales.....	27
2.9.1. Mineralización - Alteración Temprana (Tardimagmática).....	27

2.9.2. Mineralización - Alteración Hidrotermal Principal (Fílica).....	27
2.9.3. Mineralización - Alteración Hidrotermal Tardía (Alta Sulfidización).....	28
2.9.4. Mineralización Supérgena	28
2.10. Antucoya	29
2.10.1. Alteración Potásica.....	30
2.10.2. Alteración Clorítica	30
2.10.3. Alteración Cuarzo - Sericítica	30
2.10.4. Alteración Propilítica.....	30
2.10.5. Alteración Supérgena	31
2.11. Spence.....	32
2.11.1. Alteración Potásica.....	33
2.11.2. Alteración Fílica	33
2.11.3. Alteración Propilítica.....	33
2.11.4. Alteración Argílica	33
2.12. Sierra Gorda.....	34
2.12.1. Alteración Potásica.....	34
2.12.2. Alteración Fílica	35
2.12.3. Alteración Argílica	35
2.12.4. Alteración Propilítica.....	35
2.12.5. Alteración Supérgena	35
2.13. Esperanza (Distrito Centinela).....	36
2.13.1. Alteración Potásica.....	36
2.13.2. Alteración Cuarzo - Sericítica	37
2.13.3. Alteración Propilítica.....	37
2.13.4. Alteración Supérgena	37
2.13.5. Alteración Argílica Intermedia.....	37
2.14. El Tesoro (Distrito Centinela).....	38
2.15. Gabriela Mistral.....	38
2.15.1. Cuarzo - Biotita	39
2.15.2. Clorita - Albita - Sericita	39
2.15.3. Alteración Supérgena	39
2.16. Lomas Bayas	40
2.16.1. Alteración Potásica.....	40

2.16.2. Alteración Clorítica	41
2.16.3. Alteración Cuarzo - Sericita	41
2.16.4. Alteración Argílica Supérgena	41
2.17. Fortuna de Cu (Lomas Bayas II)	41
2.17.1. Alteración Potásica	41
2.17.2. Alteración Clorita - Sericita	41
2.17.3. Alteración Fílica	42
2.17.4. Alteración Supérgena	42
2.18. Zaldívar - Escondida Norte	43
2.18.1. Alteración Potásica	43
2.18.2. Alteración Fílica	44
2.18.3. Alteración Propilítica	44
2.18.4. Alteración Argílica	44
2.18.5. Alteración Supérgena	44
2.19. Escondida	46
2.19.1. Etapa 1 de Alteración Hidrotermal	47
2.19.1.1. Alteración Potásica	47
2.19.1.2. Silicificación	47
2.19.1.3. Alteración Propilítica	47
2.19.2. Etapa 2 de Alteración Hidrotermal	47
2.19.2.1. Chl - Ser ± Qz	47
2.19.2.2. Qz - Ser (Verde a Gris)	47
2.19.2.3. Py - Ser	47
2.19.3. Etapa 3 de Alteración Hidrotermal	47
2.19.3.1. Alteración Argílica Avanzada	47
2.19.4. Alteración Supérgena	48
2.20. El Salvador (Distrito Indio Muerto)	48
2.20.1. Alteración Hidrotermal Temprana	49
2.20.2. Alteración Hidrotermal Tardía	49
2.20.3. Alteración Supérgena	50
2.21. Candelaria	50
2.21.1. Alteración Sódica	51
2.21.2. Alteración Potásica (Etapa de Óxidos de Fe)	51
2.21.3. Alteración Cálctica (Etapa de Sulfuros)	51

2.21.4. Alteración Potásica - Cálctica.....	51
2.21.5. Alteración Sódico - Cálctica.....	51
2.22. Caserones	52
2.22.1. Alteración Potásica.....	53
2.22.2. Alteración Propilítica.....	53
2.22.3. Alteración Fílica	53
2.22.4. Alteración Argílica	53
2.22.5. Alteración Supérgena	53
2.23. Carmen de Andacollo.....	54
2.23.1. Alteración Potásica.....	55
2.23.2. Alteración Propilítica.....	55
2.23.3. Alteración Fílica	55
2.23.4. Alteración Argílica Supérgena	55
2.23.5. Alteración Supérgena	56
2.24. Los Pelambres.....	56
2.24.1. Alteración Potásica.....	56
2.24.2. Alteración Fílica	56
2.24.3. Alteración Propilítica.....	57
2.24.4. Alteración Supérgena	57
2.25. El Soldado.....	58
2.25.1. Alteración Hidrotermal.....	59
2.26. Río Blanco - Los Bronces	60
2.26.1. Alteración Potásica.....	61
2.26.2. Alteración Fílica	61
2.26.3. Alteración Propilítica.....	62
2.27. El Teniente.....	64
2.27.1. Etapa de Alteración Tardimagmática	64
2.27.2. Etapa de Alteración Hidrotermal Principal	64
2.27.3. Etapa de Alteración Hidrotermal Tardía	65
2.27.4. Etapa Póstuma	66
2.27.5. Alteración Supérgena	66
3. MARCO TEÓRICO.....	67
3.1. Factores Mineros, Metalúrgicos y Geológicos que Afectan el Consumo	67

3.1.1. Reología de suspensiones	67
3.1.1.1. Teoría DLVO.....	67
3.1.1.2. Doble capa eléctrica.....	67
3.1.1.3. Potencial superficial	68
3.1.1.4. Potencial zeta.....	68
3.1.1.5. Coagulación	68
3.1.1.6. Fuerza de hidratación (no DLVO).....	69
3.1.1.7. Floculación	69
3.1.1.8. Comportamiento de fluidos	69
3.1.2. Mineralogía de filosilicatos	70
3.1.3. Ley de Cu y tasa de recirculación de agua	75
4. RESULTADOS	78
4.1. Índice Mineralógico.....	78
4.2. Cálculo <i>Make up</i> Periodo 2016 - 2019.....	79
4.2.1. Macrozona Norte	80
4.2.1.1. Quebrada Blanca	80
4.2.1.2. Cerro Colorado	81
4.2.1.3. Collahuasi	81
4.2.1.4. El Abra.....	81
4.2.1.5. Radomiro Tomic.....	81
4.2.1.6. Chuquicamata	82
4.2.1.7. Ministro Hales	82
4.2.1.8. Antucoya.....	82
4.2.1.9. Spence.....	83
4.2.1.10. Sierra Gorda.....	83
4.2.1.11. Centinela.....	83
4.2.1.12. Gabriela Mistral.....	83
4.2.1.13. Lomas Bayas	84
4.2.1.14. Zaldívar.....	84
4.2.1.15. Escondida.....	84
4.2.1.16. Salvador	84
4.2.1.17. Candelaria.....	85
4.2.1.18. Caserones.....	85
4.2.1.19. Carmen de Andacollo	85

4.2.1.20. Los Pelambres.....	86
4.2.2. Macrozona Centro	86
4.2.2.1. El Soldado	86
4.2.2.2. Andina	86
4.2.2.3. Los Bronces	86
4.2.2.4. El Teniente.....	87
4.2. Proyección del Consumo de Agua Periodo 2020 - 2031.....	90
4.2.1. Escenario de proyección máxima	90
4.2.2. Escenario de proyección probable.....	90
4.2.3. Escenario de proyección mínima.....	91
5. DISCUSIÓN	95
5.1. Análisis Crítico de los Resultados.....	95
5.2. Mineralogía de Arc	95
5.3. Ley de Cu y Tasa de Recirculación de Agua	96
5.4. Demanda de Agua de Mar.....	96
5.5. Relaves	98
5.6. Propuesta Metodológica	99
6. CONCLUSIONES	103
7. REFERENCIAS.....	104
ANEXO	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Flujo del proceso de hidrometalurgia e interacción con el recurso hídrico	1
1. 2. Flujo del proceso de concentración e interacción con el recurso hídrico	1
1. 3. Mapa de ubicación del área de estudio	3
2. 1. Ubicación de yacimientos en estudio pertenecientes a la Franja del Cretácico Inferior	6
2. 2. Ubicación de yacimientos en estudio pertenecientes a la Franja del Paleoceno - Eoceno inferior	7
2. 3. Ubicación de yacimientos en estudio pertenecientes a la Franja del Eoceno superior - Oligoceno inferior	8
2. 4. Ubicación de yacimientos en estudio pertenecientes a la Franja del Neógeno	9
2. 5. Geología del área yacimiento Cerro Colorado	10

2.	6.	Modelo de alteración sección A - A´ Cerro Colorado	11
2.	7.	Modelo de mineralización sección A -A´ Cerro Colorado	12
2.	8.	Modelo de alteración sección transversal 20 mirando hacia el NW Rosario	13
2.	9.	Geología del área yacimiento Ujina	14
2.	10.	Modelo de alteración sección A - A´ Ujina	15
2.	11.	Mapa esquemático de la geología del yacimiento Quebrada Blanca	15
2.	12.	Modelo de alteración sección transversal 19400E Quebrada Blanca	17
2.	13.	Modelo de mineralización sección transversal 19400E Quebrada Blanca	18
2.	14.	Geología del área yacimiento El Abra	19
2.	15.	Modelo de alteración sección B - B´ El Abra	20
2.	16.	Modelo de mineralización del yacimiento El Abra	20
2.	17.	Geología del yacimiento Radomiro Tomic	21
2.	18.	Modelo de alteración sección B - B´ Radomiro Tomic	23
2.	19.	Modelo de mineralización sección C -C´ Radomiro Tomic	24
2.	20.	Geología del yacimiento Chuquicamata	24
2.	21.	Sección esquemática de las unidades de alteración, mineralización y zonas metalogénicas de Chuquicamata	26
2.	22.	Geología del yacimiento Ministro Hales	27
2.	23.	Modelo de alteraciones sección A - A´ Ministro Hales	29
2.	24.	Modelo de mineralización del yacimiento Ministro Hales	29
2.	25.	Geología del área yacimiento Antucoya	31
2.	26.	Modelo de alteración y mineralización Antucoya	32
2.	27.	Geología del yacimiento Spence	33
2.	28.	Modelo de alteraciones Sección A - A´ Spence	34
2.	29.	Modelo de mineralización Sección A - A´ Spence	34
2.	30.	Geología del yacimiento Sierra Gorda	35
2.	31.	Modelo de mineralización Sección B - B´ Sierra Gorda	36
2.	32.	Geología del yacimiento Esperanza	36
2.	33.	Modelo de alteración Sección A -A´ Esperanza	37
2.	34.	Modelo de mineralización Sección A -A´ Esperanza	38
2.	35.	Modelo de depósito exótico de Cu	38
2.	36.	Geología del yacimiento Gabriela Mistral	39
2.	37.	Modelo de alteración Sección B - B´ Gabriela Mistral	40
2.	38.	Modelo de mineralización Sección B - B´ Gabriela Mistral	40
2.	39.	Vista isométrica del modelo de alteraciones yacimiento Fortuna de Cu	42
2.	40.	Vista isométrica del modelo de mineralización yacimiento Fortuna de Cu ...	43
2.	41.	Geología del yacimiento Zaldívar - Escondida Norte	44
2.	42.	Modelo de alteraciones Sección A - A´ Escondida Norte	45
2.	43.	Modelo mineralización Sección A - A´ Escondida Norte	45
2.	44.	Modelo de mineralización Sección A - A´ Zaldívar	46
2.	45.	Geología del yacimiento Escondida	46
2.	46.	Modelo de alteraciones Sección A - A´ Escondida	48
2.	47.	Modelo de mineralización Sección A - A´ Escondida	48
2.	48.	Geología del Distrito Indio Muerto	49
2.	49.	Mapa de alteraciones Distrito Indio Muerto	50
2.	50.	Geología del yacimiento Candelaria	51
2.	51.	Modelo de alteraciones Sección A -A´ Candelaria	52

2.	52.	Modelo de mineralización Sección B - B´ Candelaria	52
2.	53.	Geología del yacimiento Caserones	53
2.	54.	Modelo de alteraciones yacimiento Caserones	54
2.	55.	Modelo de mineralización yacimiento Caserones	54
2.	56.	Geología del yacimiento Carmen de Andacollo	55
2.	57.	Modelo de mineralización Sección A - A´ Carmen de Andacollo	56
2.	58.	Modelo litológico de Los Pelambres	57
2.	59.	Modelo de alteración de Los Pelambres	58
2.	60.	Mapa esquemático de distribución de cuerpos mineralizados yacimiento El Soldado	59
2.	61.	Modelo de mineralización El Soldado	60
2.	62.	Geología del yacimiento Rio Blanco - Los Bronces	61
2.	63.	Modelo de alteraciones yacimiento Río Blanco en sector Don Luís	63
2.	64.	Modelo de alteraciones Sección C - C´ Los Bronces	63
2.	65.	Unidades litológicas de El Teniente a una cota de 2165 m s.n.m.	65
3.	1.	Modelo de doble capa eléctrica	67
3.	2.	Reograma para diferentes tipos de fluidos	70
3.	3.	Clasificación del grupo mineral filosilicatos	71
3.	4.	Comparación entre el límite de fluencia Bingham y el porcentaje de sólidos en suspensión para cada filosilicato en estudio	74
3.	5.	Comparación entre viscosidad de Bingham y porcentaje de sólidos en suspensión para cada filosilicato en estudio	75
3.	6.	Consumo de agua captada por tonelada de Cu producido versus ley de cabeza...	76
4.	1.	Fórmula Make up por proceso	79
4.	2.	Make up concentración período 2016 - 2019	88
4.	3.	Make up hidrometalurgia período 2016 - 2019	89
4.	4.	Gráfico de proyección del consumo de agua en concentración durante el periodo 2020 - 2031	93
4.	5.	Gráfico comparación de proyecciones de consumo de agua en concentración. Escenario probable total y COCHILCO 2020c	93
4.	6.	Gráfico de proyección del consumo de agua en hidrometalurgia durante el periodo 2020 - 2031	94
4.	7.	Gráfico comparación de proyecciones de consumo de agua en hidrometalurgia. Escenario probable total y COCHILCO 2020c	94
5.	1.	Variograma con meseta y alcance	100
5.	2.	Variogramas experimentales en dos direcciones diferentes ajustados a variogramas modelados a efecto pepita y esférico	101
5.	3.	Flujo de trabajo de la metodología propuesta	102

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación	Página
3.1.	76
3.2.	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
4. 1. Índice mineralógico de asociaciones mineralógicas de filosilicatos y Qz según su comportamiento reológico	78
4. 2. Clasificación de faenas mineras de acuerdo con su contenido de filosilicatos o índice mineralógico	79
4. 3. Estadísticas nacionales consumo de agua por proceso periodo 2016 - 2019	80
4. 4. Estimación de consumo de agua por proceso único de tratamiento periodo 2016 - 2019	80
4. 5. <i>Make up</i> y producción de Cu Quebrada Blanca periodo 2016 - 2019	81
4. 6. <i>Make up</i> y producción de Cu Cerro Colorado periodo 2016 - 2019	81
4. 7. <i>Make up</i> y producción de Cu Collahuasi periodo 2016 - 2019	81
4. 8. <i>Make up</i> y producción de Cu El Abra periodo 2016 - 2019	81
4. 9. <i>Make up</i> y producción de Cu Radomiro Tomic periodo 2016 - 2019	82
4. 10. <i>Make up</i> y producción de Cu Chuquicamata periodo 2016 - 2019	82
4. 11. <i>Make up</i> y producción de Cu Ministro Hales periodo 2016 - 2019	82
4. 12. <i>Make up</i> y producción de Cu Antucoya periodo 2016 - 2019	82
4. 13. <i>Make up</i> y producción de Cu Spence periodo 2016 - 2019	83
4. 14. <i>Make up</i> y producción de Cu Sierra Gorda periodo 2016 - 2019	83
4. 15. <i>Make up</i> y producción de Cu Centinela periodo 2016 - 2019	83
4. 16. <i>Make up</i> y producción de Cu Gabriela Mistral periodo 2016 - 2019	83
4. 17. <i>Make up</i> y producción de Cu Lomas Bayas periodo 2016 - 2019	84
4. 18. <i>Make up</i> y producción de Cu Zaldívar periodo 2016 - 2019	84
4. 19. <i>Make up</i> y producción de Cu Escondida periodo 2016 - 2019	84
4. 20. <i>Make up</i> y producción de Cu El Salvador periodo 2016 - 2019	85
4. 21. <i>Make up</i> y producción de Cu Candelaria periodo 2016 - 2019	85
4. 22. <i>Make up</i> y producción de Cu Caserones periodo 2016 - 2019	85
4. 23. <i>Make up</i> y producción de Cu Carmen de Andacollo periodo 2016 - 2019	85
4. 24. <i>Make up</i> y producción de Cu Los Pelambres periodo 2016 - 2019	86
4. 25. <i>Make up</i> y producción de Cu El Soldado periodo 2016 - 2019	86
4. 26. <i>Make up</i> y producción de Cu Andina periodo 2016 - 2019	86
4. 27. <i>Make up</i> y producción de Cu Los Bronces periodo 2016 - 2019	87
4. 28. <i>Make up</i> y producción de Cu El Teniente periodo 2016 - 2019	87
4. 29. Estimación del consumo de agua en un escenario máximo para el periodo 2020 - 2025	90
4. 30. Estimación del consumo de agua en un escenario máximo para el periodo 2026 - 2031	90

4.	31.	Estimación del consumo de agua en un escenario probable para el periodo 2020 - 2025	91
4.	32.	Estimación del consumo de agua en un escenario probable para el periodo 2026 - 2031	91
4.	33.	Estimación del consumo de agua en un escenario mínimo para el periodo 2020 - 2025	91
4.	34.	Estimación del consumo de agua en un escenario mínimo para el periodo 2026 - 2031	91
4.	35.	Producción de Cu en el año 2019	91
4.	36.	Desglose de estimación de producción de otras faenas por proceso	92
4.	37.	Estimación del consumo de agua de otras faenas de Cu y parámetros considerados	92
5.	1.	Relación ley de Cu y toneladas de material a procesar por tonelada de Cu fino	96
5.	2.	Plantas desaladoras y de impulsión de agua de mar para la minería en Chile	97
5.	3.	Cartera de proyectos de plantas desaladoras y sistemas de impulsión de agua de mar en minería	97
5.	4.	Tipos de relave según su tratamiento	98
5.	5.	Extracto de catastro de relaves en Chile	98



RESUMEN

El agua constituye un recurso vital para la vida en nuestro planeta y el desarrollo de la sociedad. Entre los muchos ámbitos que se utiliza este elemento destaca la minería del Cu en Chile. Esta actividad se desarrolla a diferentes escalas a lo largo de las macrozonas Norte y Centro del país. Sin embargo, frente al surgimiento y avance del cambio climático acompañado de la sobreexplotación del recurso hídrico ha gatillado la ocurrencia de numerosos escenarios de escasez y estrés hídrico en el territorio.

En la minería del Cu, el procesamiento del mineral extraído de la mina es vía hidrometalurgia y/o concentración. Estas técnicas requieren del uso de agua para llevarse a cabo, destacando el consumo 4 veces mayor de la concentración respecto a la hidrometalurgia. La variabilidad en la cantidad de agua a utilizar en el proceso responde a factores tales como: escala de la faena, tecnología disponible, tasa de recirculación de agua, ley de cabeza del material a procesar y la reología de suspensiones, con énfasis en la mineralogía de filosilicatos, específicamente los pertenecientes al grupo de las arcillas. Este grupo, comúnmente presente acompañando a la mineralogía metálica de interés, constituye variados problemas en el procesamiento de minerales y consecuentemente, en el consumo de agua.

Para medir y comparar el comportamiento en el consumo de agua de las 24 faenas pertenecientes a la gran minería con información disponible, se calculó el *Make up* por proceso, para el periodo 2016 - 2019 y en base a la geología de los depósitos se propone una clasificación en contenido de arcillas para estos. Posteriormente se construye una proyección del consumo de agua de las faenas en estudio y toda la minería del Cu para el docenio 2020 - 2031. El uso de agua varía de 11,365 a 15,354 m³/s en concentración, mientras que en hidrometalurgia de 2,144 a 1,135 m³/s en un escenario probable total (toda la minería del Cu).

Debido a la poca e inexacta información recabada, se propone un flujo de trabajo que considera un muestreo de la mineralogía de arcillas cuantitativa, mediante la aplicación de técnicas analíticas adecuadas, uso de QA/QC y técnicas propias de la geoestadística para discernir la variabilidad espacial de la mineralogía mediante modelos de estimación y/o simulación, para posteriormente medir la variabilidad de la mineralogía a procesar y su relación con el consumo de agua.

Se concluye que el uso de agua en la minería del Cu para el docenio considerado aumentará de manera considerable debido a: la caída de las leyes de cabeza, el creciente tratamiento vía concentración y la puesta en marcha de nuevos proyectos de explotación o ampliación/reposición de estos. Sin embargo, los esfuerzos por aminorar el empleo de agua mediante mejores técnicas de deposición de relaves, avances tecnológicos conducentes a subir las tasas de recirculación de agua y el uso de agua de mar/desalada, son un avance importante para lidiar con la indiscutible escasez hídrica en el país.

ABREVIACIONES

Alb: Albita	Gal: Galena	Tur: Turmalina
Alun: Alunita	Goeth: Goethita	Turq: Turquesa
And: Andalusita	Gr: Granate	Verm: Vermiculita
Anh: Anhidrita	Hbl: Hornblenda	Yes: Yeso
Ank: Ankerita	Hem: Hematita	Zeo: Zeolita
Ant: Antlerita	Id: Idaíta	
Ap: Apatito	Ill: Illita	
Apy: Arsenopirita	Jar: Jarosita	
Arc: Arcillas	Kaol: Caolinita	
Atac: Atacamita	Kfeld: Feldespato potásico	
Au: Oro	Lim: Limonitas	
Azur: Azurita	Mal: Malaquita	
Bar: Baritina	Mgt: Magnetita	
Bn: Bornita	Mn: Manganeseo	
Broc: Brochantita	Mont: Montmorillonita	
Bt: Biotita	Mo: Molibdeno	
Ca: Calcio	Moly: Molibdenita	
Cal: Calcita	Musc: Muscovita	
Carb: Carbonato	Na: Sodio	
Cc: Calcosina	Neot: Neotocita	
Chal: Chalcantita	Nont: Nontronita	
Chl: Clorita	Plg: Plagioclasa	
Chry: Crisocola	Px: Piroxeno	
Cor: Corindón	Py: Piritita	
Cpy: Calcopirita	Pyr: Pirofilita	
Cu: Cobre	Qz: Cuarzo	
Cup: Cuprita	Rut: Rutilo	
Cris: Crisotilo	Samp: Sampleita	
Cv: Covelina	Scp: Escapolita	
Dias: Diasporo	Ser: Sericita	
Dic: Dickita	Serp: Serpentina	
Dig: Digenita	Sid: Siderita	
Ena: Enargita	Sil: Sílice	
Ep: Epidota	Tal: Talco	
Esf: Esfalerita	Ten: Tenantita	
Esmec: Esmectita	Teno: Tenorita	
Flog: Flogopita	Tetr: Tetraedrita	
Fe: Hierro	Tit: Titanita	
Fm.: Formación geológica		

1.1. Objetivo

Desarrollar una metodología de proyección del consumo de agua de acuerdo con la información recabada, para el periodo 2020 - 2031 e investigar los principales factores minero - geológicos que inciden en el procesamiento de minerales de Cu.

1.1.1. Objetivos específicos

- Investigar los principales factores que inciden la utilización del recurso hídrico, con énfasis en la mineralogía de Arc.
- Estimar y proyectar el uso de agua de acuerdo con los parámetros de extracción de cada faena.
- Realizar una metodología o flujo de trabajo para medir verazmente el impacto en el consumo de agua de la mineralogía de Arc.

1.2. Metodología

1.2.1. Etapa de gabinete

Desarrollo de actividades de recopilación, análisis, interpretación y discusión de datos e información bibliográfica, para la posterior redacción del texto de la presente tesis.

1.3. Ubicación

Las faenas mineras pertenecientes a la gran minería del Cu en Chile consideradas en el presente trabajo (Figura 1.3.) se distribuyen ampliamente en la Macrozona Norte, conformada por las regiones de: Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta, Atacama y Coquimbo. Constituyendo el polo principal de producción de cátodos y concentrados de Cu a nivel nacional.

La Macrozona Centro compuesta por las regiones de: Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y Maule alberga menor cantidad de depósitos de Cu. Sin embargo, el gran tamaño de estos le confiere competitividad e importancia nacional.

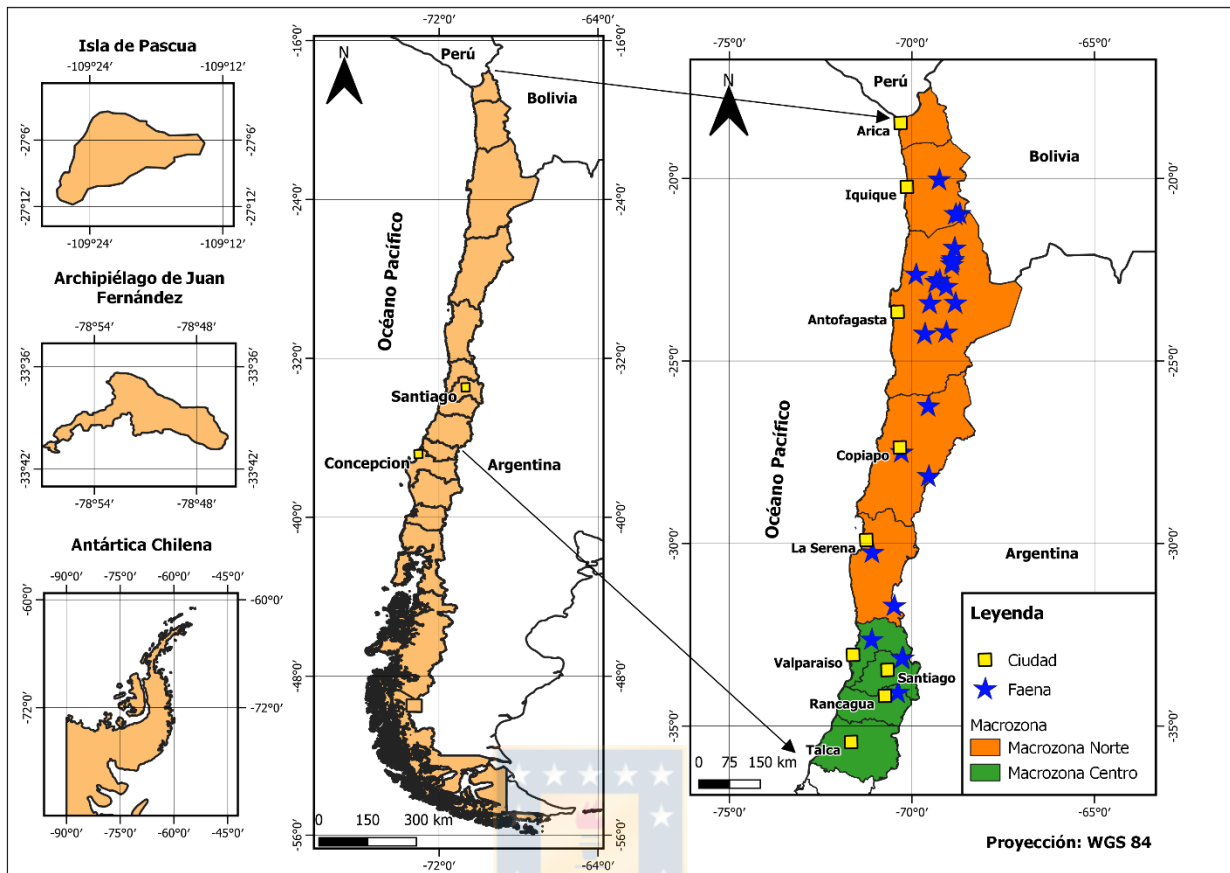


Figura 1.3. Mapa de ubicación del área de estudio. Elaboración propia.

1.4. Hidrografía, Clima y Orografía

1.4.1. Macrozona Norte

Corresponde al área geográfica más seca de Chile, con gran parte del territorio cubierto por el Desierto de Atacama, cuya extensión alcanza los 180.000 km². Se caracteriza por un clima árido a semiárido, con escasas precipitaciones que aumentan en dirección sur, siendo el promedio de lluvia caída de 87 mm/año. Presenta una escasa escorrentía de 36,9 m³/s, lo que equivale al 0,13% del total nacional (DGA, 2015).

Pese al grado de escasez hídrica, esta macrozona posee un importante número de lagos y lagunas. Con un total de 545 cuerpos de agua, lo que representa el 4,3% del total nacional. Entre las más importantes se encuentran la laguna del Negro Francisco, Cocotani, Arabilla, Parinacota y el Salar de Atacama. El curso de agua que más destaca es el río Loa, siendo este el río más largo de Chile, el que cuenta con 440 km de longitud y área de cuenca de 33.081 km² (DGA, 2015).

1.4.2. Macrozona Centro

Esta macrozona posee un clima mediterráneo con precipitaciones moderadas, siendo el promedio anual de 943 mm/año que se concentran en invierno y con una estación seca prolongada de 7 a 8 meses. Presenta una escorrentía de 1.116 m³/s, lo que equivale a un 3,8% del total nacional. Debido a la presencia de mayores precipitaciones y abundancia de agua producto de los deshielos, la zona es considerada como uno de los suelos más fértiles de Chile, concentrando una importante actividad agropecuaria, industrial y minera. Por el mismo motivo también se observa una gran variedad de flora y fauna silvestre (DGA,2015).

Ninguno de los cursos de agua supera los 250 km de longitud. Dentro de los ríos más importantes se encuentran el río Aconcagua, Petorca, Maipo, Rapel y Maule. En cuanto a lagos y lagunas, existen 531 cuerpos de agua lo que equivale al 4,2% del total nacional. Se destaca la laguna del Maule, Cauquenes y Peñuelas (DGA, 2015).

1.5. Trabajos Anteriores

Maksaev (2001): Realiza una reseña metalogénica de Chile y de los procesos que determinan la metalogénesis andina. En su trabajo describe las franjas metalogénicas consideradas para agrupar los yacimientos en estudio.

Ndlovu et al.; (2011, 2014): Estudia el comportamiento de interacciones en suspensiones puras de Kaol, Tal, Verm, Ill y Musc en términos de su carga superficial para luego correlacionarlas con sus propiedades reológicas y comportamiento en suspensión. Incluyendo al Cris, Mont y Qz.

Cejas (2018): Relaciona el consumo de agua fresca captada por tonelada de Cu producido considerando las tasas de recirculación de agua con la ley de Cu para 10 faenas de la gran minería en Chile.

COCHILCO (2019): Publicación de la cartera de proyectos en la minería chilena para el periodo 2019 - 2028.

SERNAGEOMIN (2020a): Catastro de la minería en Chile y publicación de la capacidad instalada de procesamiento por hidrometalurgia y/o concentración de las plantas de beneficio.

COCHILCO (2020a): Realiza un catastro y estadísticas del consumo de agua en la minería del Cu a nivel nacional y regional por tipo de procesamiento y fuente. Además, publica los proyectos en cartera de plantas desaladoras e impulsión.

COCHILCO (2020b): Publicación de la cartera de proyectos en la minería chilena para el periodo 2020 - 2029.

COCHILCO (2020c): Lleva a cabo una proyección del consumo de agua en la minería del Cu para el periodo 2020 - 2031, considerando el consumo unitario por planta por proceso y la cartera de proyectos de inversión para el decenio.

Consejo Minero (2020): Reporte de extracción de aguas por fuente, por parte de las empresas mineras socias para el periodo 2016 - 2019.

COCHILCO (2021a): Publicación de la cartera de proyectos en la minería chilena para el periodo 2021 - 2030.

1.6. Agradecimientos

En primer lugar, agradecer al Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM) por realizar la presente tesis como becario del proyecto ANID/FONDAP/15130015.

A todo el cuerpo docente y no docente del Departamento Ciencias de la Tierra, por toda la enseñanza, apoyo, ánimos y buenos momentos durante todos los años universitarios.

A la comisión encargada de revisar este trabajo y especialmente al Dr. Leopoldo Gutiérrez por su patrocinio y dirección en la realización de esta tesis.

A mis compañeros y amigos de geología, por los momentos buenos y malos pero inolvidables.

A María José, mi pareja... gracias por acompañarme, apoyarme y vivir juntos la experiencia universitaria.

Finalmente, agradecer a mi familia por el apoyo emocional y físico conferido a lo largo de todos los años de mi educación... muchas gracias.

2. MARCO GEOLÓGICO

2.1. Franjas Metalogénicas

2.1.1. Franja Metalogénica del Cretácico Inferior

Existe un variado conjunto de tipos de depósitos metalíferos asociados a rocas del Cretácico Inferior a lo largo de la Cordillera de Costa del norte y centro de Chile enmarcados por la ocurrencia del Sistema de Falla de Atacama (Maksaev, 2001). Entre estos destacan los pórfidos cupríferos Andacollo y Antucoya, el depósito tipo IOCG Candelaria y el estratoligado El Soldado (Figura 2.1.).

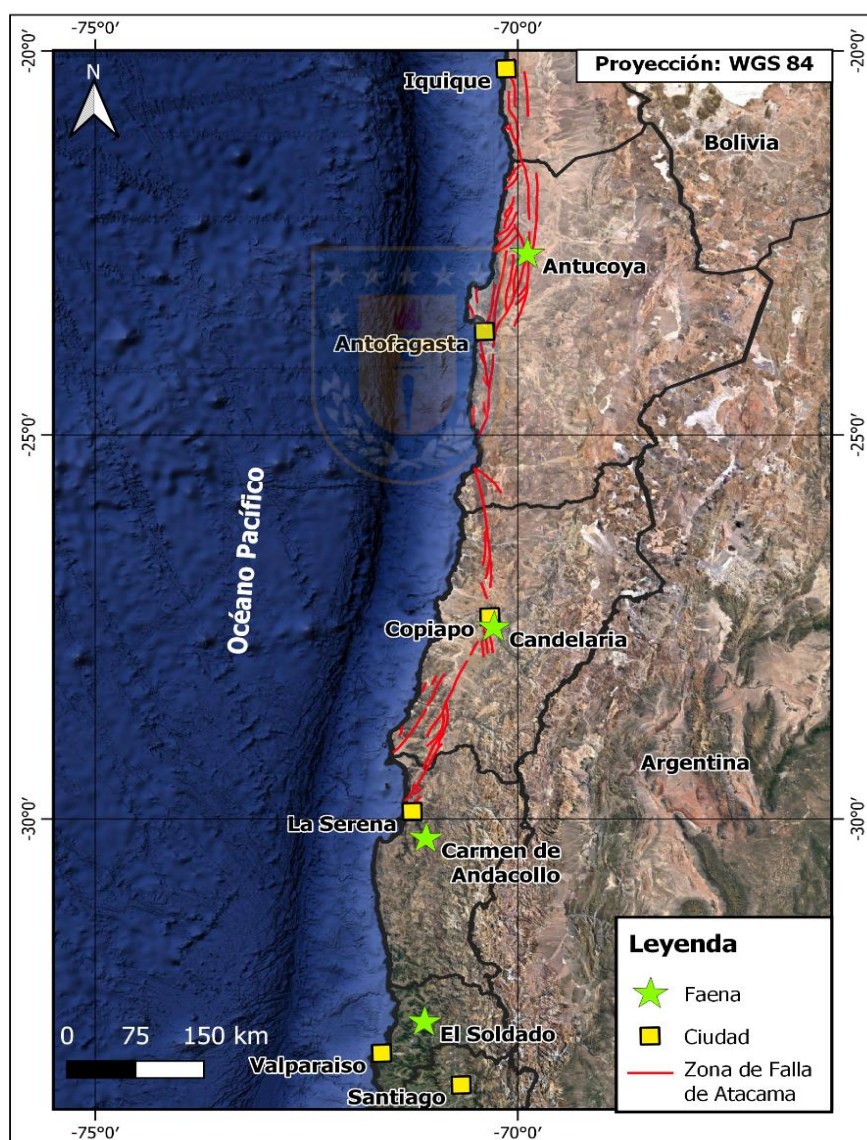


Figura 2.1. Ubicación de yacimientos en estudio pertenecientes a la Franja del Cretácico Inferior, fallas modificadas de González & Carrizo, 2003.

2.1.2. Franja Metalogénica del Paleoceno - Eoceno inferior

Esta franja se extiende desde el sur del Perú hasta la latitud de Vallenar ($28^{\circ}30'$) en Chile, ocupando la porción central del país (Maksaev, 2001). Dentro de esta se sitúan pórfidos cupríferos tales como: Cerro Colorado, Spence, Sierra Gorda y Lomas Bayas (Figura 2.2).

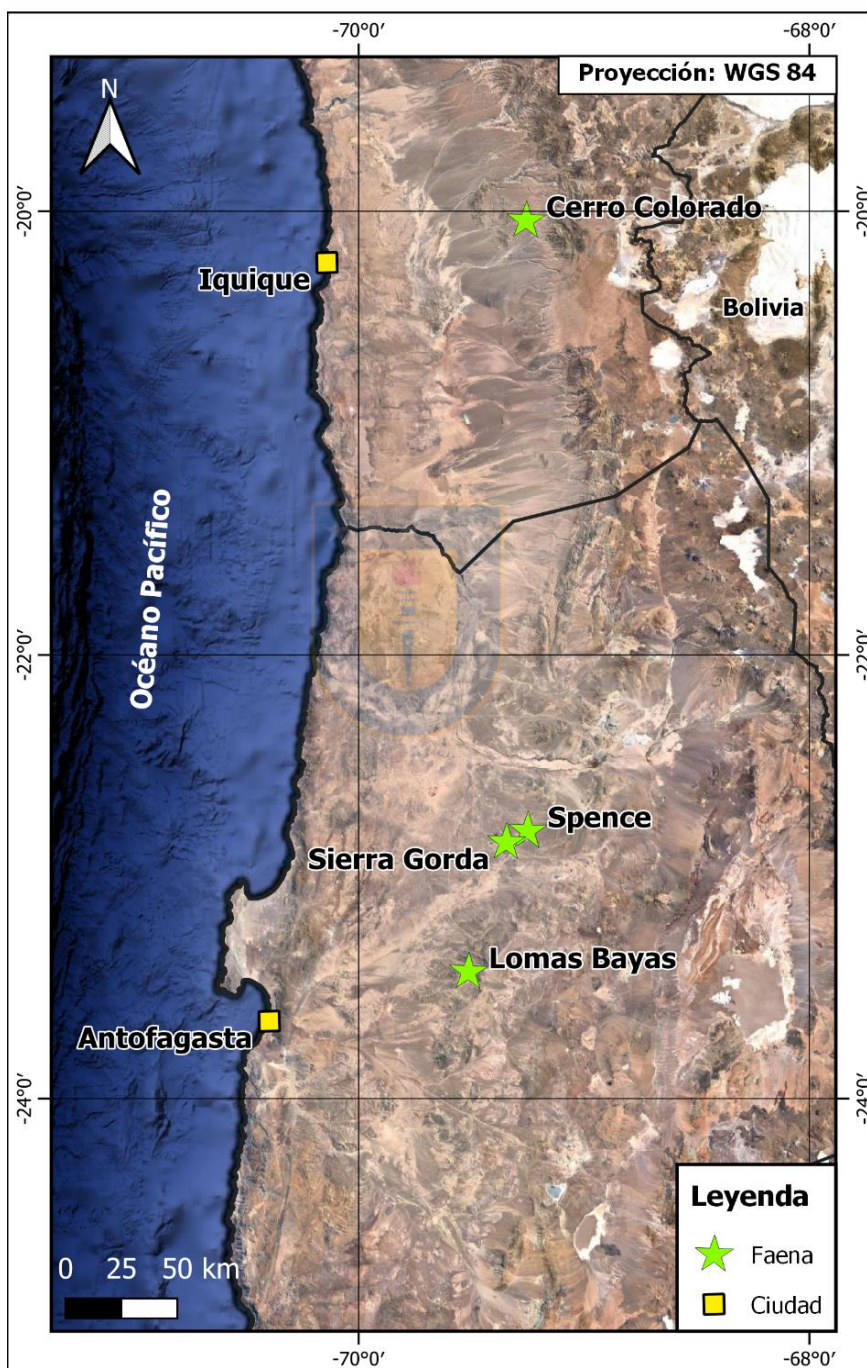


Figura 2.2. Ubicación de yacimientos en estudio pertenecientes a la Franja del Paleoceno - Eoceno inferior.

2.1.3. Franja Metalogénica del Eoceno superior - Oligoceno inferior

Esta franja incluye los yacimientos de mayor importancia económica de Chile, los que corresponden a pórfidos de Cu - Mo distribuidos dentro del dominio del Sistema de Falla de Domeyko (Maksaev, 2001). Los yacimientos estudiados de esta franja son: Quebrada Blanca, Rosario, Ujina, El Abra, Radomiro Tomic, Chuquicamata, Ministro Hales, Centinela, Gabriela Mistral, Zaldívar, Escondida y El Salvador (Figura 2.3.).

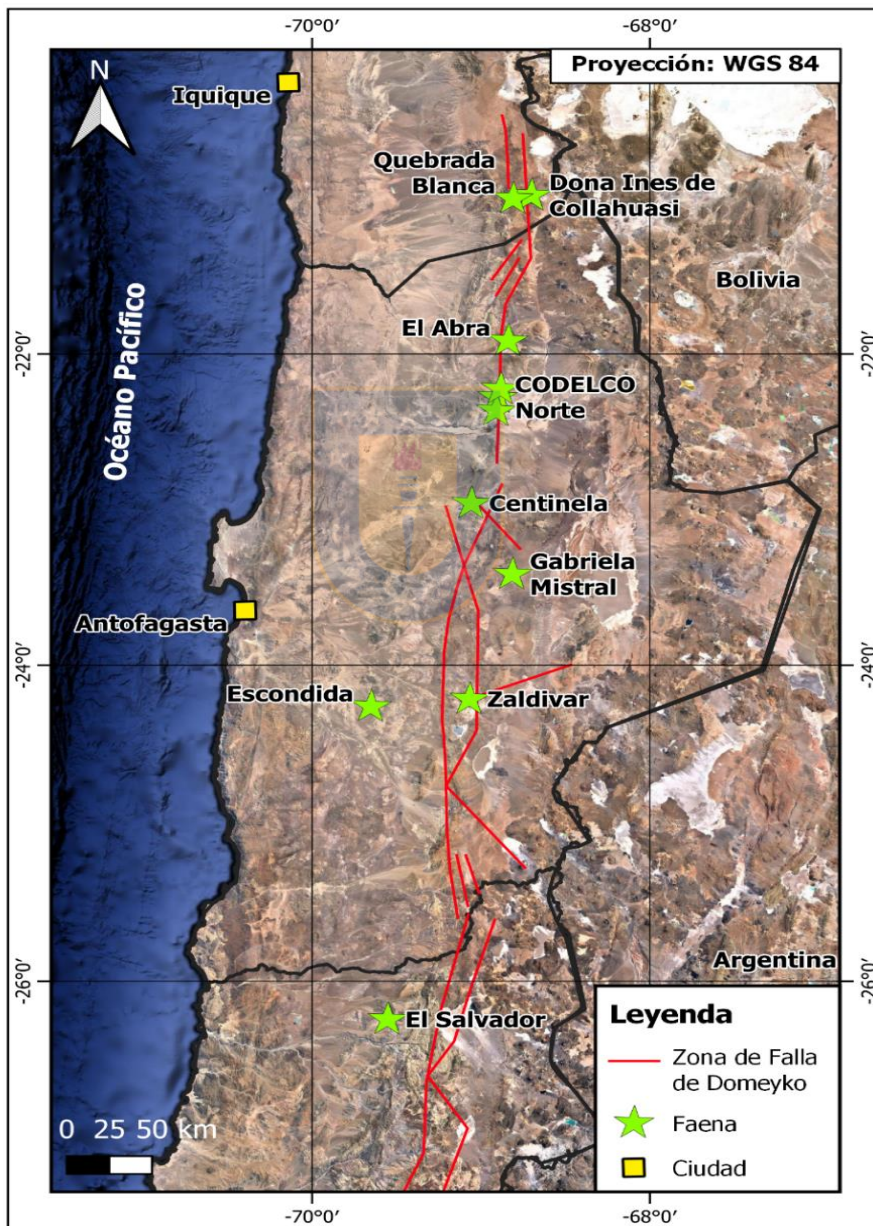


Figura 2.3. Ubicación de yacimientos en estudio pertenecientes a la Franja del Eoceno superior - Oligoceno inferior, fallas modificadas de Maksaev, 2001.

2.1.4. Franja Metalogénica del Neógeno

Esta es la franja más oriental de Chile y se extiende por la alta cordillera en el sector adyacente al límite con Bolivia y Argentina, proyectándose hacia el oriente en el territorio de dichos países. La faja de epitermales de Maricunga y El Indio ubicadas en la alta cordillera entre los 26° y 33°S se incluye dentro de esta franja (Maksaev, 2001). Los yacimientos en estudio corresponden a Caserones, Los Pelambres, Río Blanco - Los Bronces y El Teniente (Figura 2.4.).

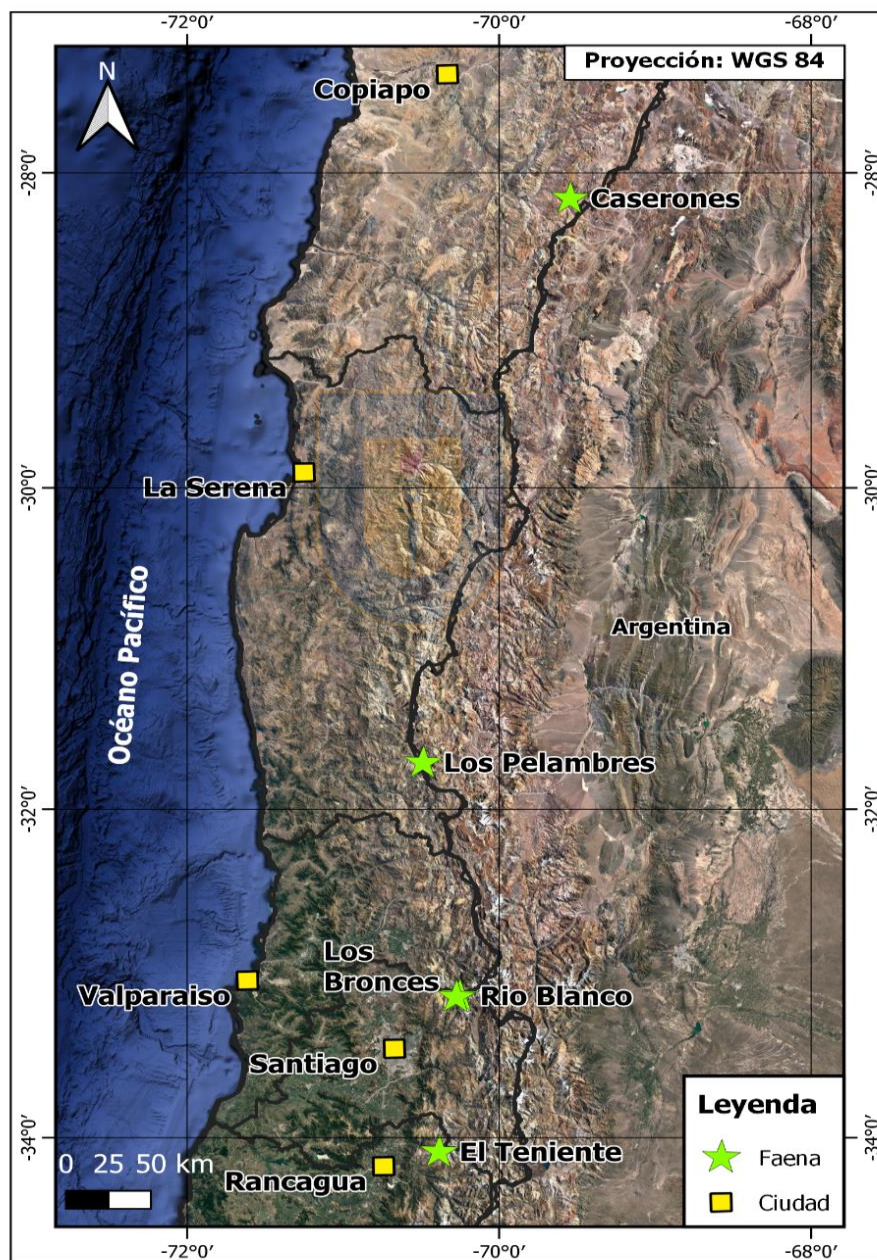


Figura 2.4. Ubicación de yacimientos en estudio pertenecientes a la Franja del Neógeno.

2.2. Cerro Colorado

Cerro Colorado corresponde a un depósito tipo pórfido cuprífero. La geología del área (Figura 2.5.) corresponde a una secuencia de tobas andesíticas cretácicas, lavas y aglomerados de la Fm. Cerro Empexa, múltiples fases de pórfidos tonalíticos, graníticos y cuarzomonzoníticos emplazados durante el Cretácico y Terciario temprano. Estas litologías están cubiertas por una secuencia localmente gruesa de ignimbritas del Plioceno y gravas de la Fm. Altos de Pica. La mineralización de Cu está relacionada con intrusivos de microbrecha cuarzomonzonítica y tonalita (Hoffmann, 2012).

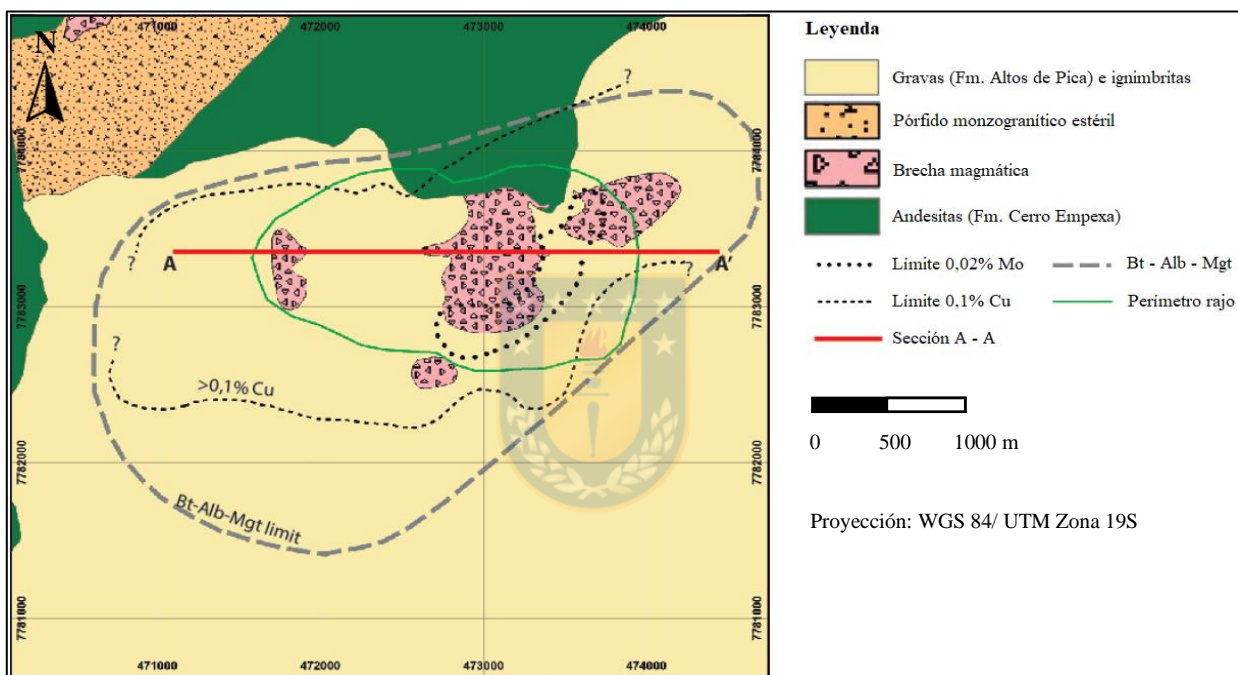


Figura 2.5. Geología del área yacimiento Cerro Colorado. Modificado de Bouzari & Clark, 2006.

2.2.1. Etapa de Alteración Temprana

Bt - Alb - Mgt (Figura 2.6.): corresponde a una etapa de alteración temprana que afecta ampliamente a las rocas andesíticas de la Fm. Cerro Empexa. Se caracteriza por una granulometría muy fina ($< 30 \mu\text{m}$) de Bt ($\leq 35\%$), Plg sódica ($\leq 40\%$), Mgt ($\geq 3\%$) y Ap como accesorio. Esta alteración no está acompañada de una mineralización de sulfuros. También se reconoce dentro de esta etapa la ocurrencia de vetillas de Kfeld débil (Bouzari & Clark, 2006).

2.2.2. Etapa de Alteración y Mineralización Principal

Ser - Chl - Arc y Ser - Chl: equivalente a una Alteración Argílica Intermedia, que representa el dominio de alteración más fuertemente mineralizado. La ocurrencia es en vetillas con bordes

planares que aumenta su grado pervasivo a niveles más someros. Los minerales presentes son Chl, Esmec (comúnmente Nont y Mont) y Musc. La Py y Cpy aparecen como intercrecimiento con Chl y Musc (Bouzari & Clark, 2006).

Qz - Ser - Arc: constituye una transición entre la Alteración Argílica Intermedia y Avanzada. El Qz constituye la fase dominante ($\leq 35\%$) en intercrecimiento con Musc e Ill. La Ill ($>25\%$) es la Arc dominante, seguida por Esmec. La Cpy y Py están originalmente en intercrecimiento con el Qz y Ser, que luego son reemplazados por Cc (Bouzari & Clark, 2006).

And - Pyr - Dias y Dias dominante: equivalente a una Alteración Argílica Avanzada. Se encuentra ampliamente sobrepuesta por una Alteración Supérgena. Se observa la ocurrencia de Dic y Kaol hipógenas y supérgenas (Bouzari & Clark, 2006).

2.2.3. Etapa de Alteración y Mineralización Transicional

Qz - Ser - Py: esta asociación se caracteriza por ser coetánea al emplazamiento del cuerpo de brecha. Corresponde a una Alteración Fílica o Sericítica. La Cpy presente en esta etapa es menor a la principal y se encuentra reemplazada por Cc. Destaca la ocurrencia de Moly como cemento de brecha, en vetillas y *stockworks* en andesita (Bouzari & Clark, 2006).

2.2.4. Etapa Tardía de Vetillas de Pirita

Esta etapa se caracteriza por la ocurrencia de vetillas de Py y Qz - Py que varían entre algunos milímetros a decenas de centímetros de espesor. Estas cortan a todas las alteraciones previas (Bouzari & Clark, 2006).

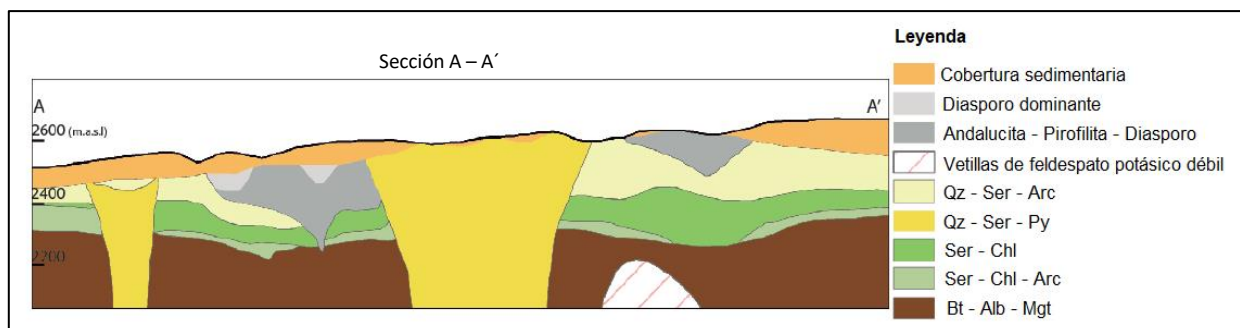


Figura 2.6. Modelo de alteración sección A - A' Cerro Colorado. Modificado de Bouzari & Clark, 2006.

Finalmente, ocurre un episodio de Alteración Supérgena, la cual oblitera a las anteriores. La Figura 2.7. exhibe la extensión de esta y las asociaciones de mineralización en el yacimiento.

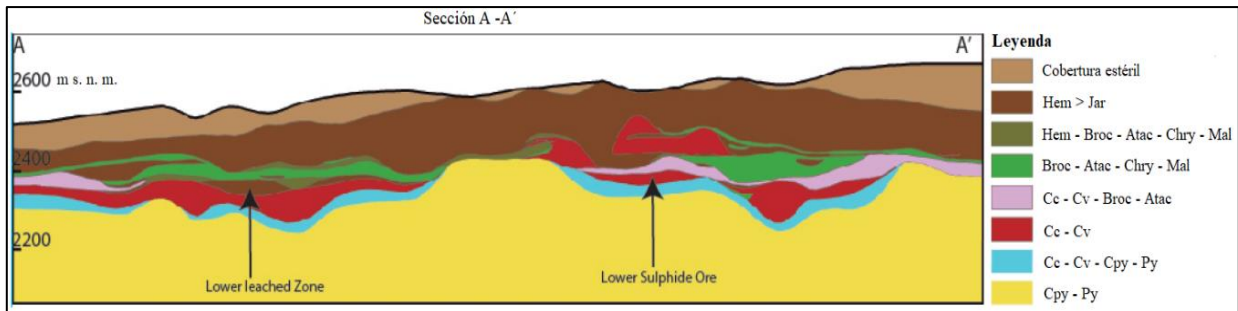


Figura 2.7. Modelo de mineralización sección A -A' Cerro Colorado. Modificado de Bouzari & Clark, 2002.

2.3. Rosario (Distrito Collahuasi)

El Distrito Collahuasi se divide en tres dominios geológicos, separados por dos sistemas estructurales de escala regional, estos son en dirección W - E el Sistema de Falla Oeste y el Sistema de Falla El Loa. Los dominios corresponden a: Dominio Mesozoico Occidental (Fm. Quehuita y Fm. Cerro Empexa); Dominio Paleozoico Central (Fm. Collahuasi); y Dominio Cenozoico Oriental (rocas volcánicas, piroclásticas y estratovolcanes) (Vivanco, 2020).

El Pórfido Rosario corresponde a un intrusivo subvolcánico de composición cuarzomonzonítica que posee mineralización Cu - Mo de tipo hipógena principalmente. Los minerales metálicos característicos corresponden a Cpy, Py, Bn, trazas de sulfosales de Cu - As (Ena, Tetr - Ten) y Moly (Vivanco, 2020).

2.3.1. Alteración Propilítica (P)

Afecta a rocas volcánicas y volcanoclásticas tales como andesitas, dacitas y rocas sedimentarias (Vivanco, 2020).

2.3.2. Alteración Potásica (B, K y FK)

Presente en la porción central del Pórfido Rosario y la zona de contacto con las rocas de caja con la ocurrencia de Bt secundaria, Kfeld secundario y cantidades subordinadas de Mgt como mineral accesorio (Figura 2.8.). Esta alteración y la Propilítica se relacionan a las primeras etapas de la mineralización de Cu y Mo (Masterman, 2003 en Vivanco, 2020).

2.3.3. Alteración Cuarzo - Sericítica (QS y SQS)

Se dispone rodeando al núcleo de Alteración Potásica, parcialmente erosionada. Se relaciona al evento principal de mineralización y que oblitera la Alteración Potásica en gran parte de la columna reconocida. Se caracteriza por la presencia de Qz y Ser reemplazando a Plg y Kfeld, y como halo en vetillas. Esta alteración afecta principalmente al Pórfido Rosario y Collahuasi, además de las unidades volcánicas de composición más ácida (Vivanco, 2020).

2.3.4. Alteración Sericita Gris Verde (CS)

Sobreimpuesta a la Alteración Potásica inicial, se determina por su alta pervasividad, pues oblitera completamente la textura de la roca. Se desarrolla en halos subparalelos, más bien extensos, en vetillas del tipo C. Corresponde a un reemplazo de los minerales por un agregado fino de Ser gris verdosa y Qz. En esta alteración son abundantes los sulfuros de Cu diseminados, Cpy \pm Bn (Vivanco, 2020).

2.3.5. Alteración Argílica y Argílica avanzada (A)

Abarcan un gran volumen en la parte central de la columna de roca. La Alteración Argílica se caracteriza por importantes cantidades de Kaol - Mont - Esmec. La Alteración Argílica Avanzada se localiza en sectores donde gran parte de los minerales son alterados a Dic - Kaol - Pyr - Dias - Alun - Qz (Vivanco, 2020).

2.3.6. Skarn (SK) y Hornfels (HNF)

Ocurre localmente, donde el Pórfido Rosario se encuentra en contacto con rocas de caja calcáreas de la unidad sedimentaria, generando zonas discretas de Ep, Gr y sulfuros, en conjunto con sectores de alteración tipo Hornfels producto del metamorfismo de contacto (Vivanco, 2020).

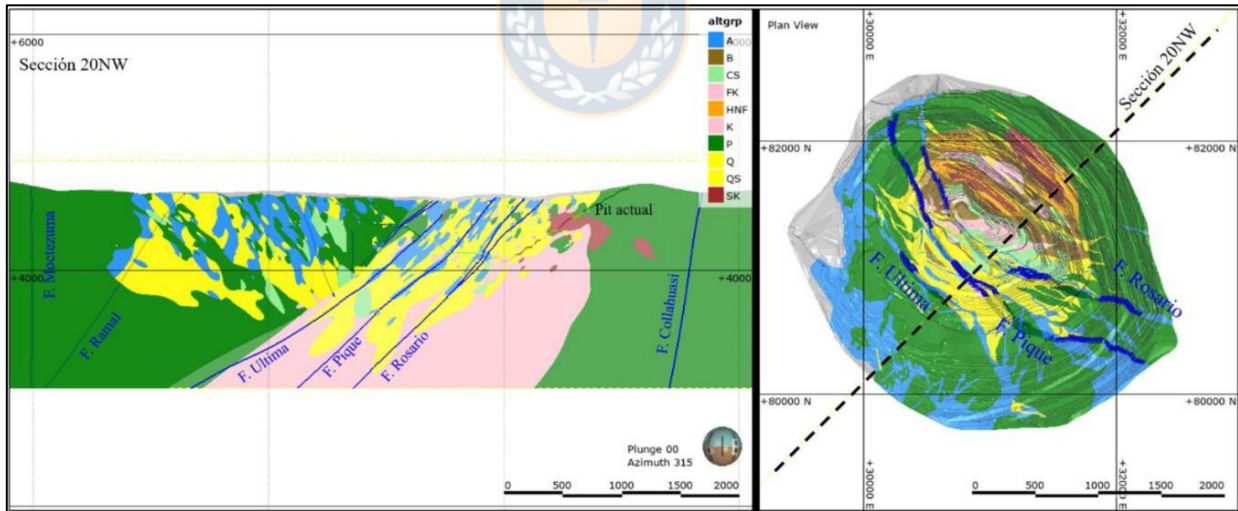


Figura 2.8. Modelo de alteración sección transversal 20 mirando hacia el NW Rosario. A: Argílica; B: Biotítica; CS: Sericita Gris Verde; K: Potásica y FK: Fondo Potásico se agrupan en una sola unidad; HNF: Hornfels; P: Propilítica; SK: Skarn; Qs: Cuarzo - Sericita y SQS: Cuarzo - Sericita selectiva se agrupan en una unidad. Extraído de Vivanco, 2020.

2.4. Ujina (Distrito Collahuasi)

El yacimiento Ujina corresponde a un pórfido mineralizado de composición cuarzomonzonítica emplazado en una sucesión de andesitas, dacitas, riolitas y brechas sedimentarias pertenecientes a la Fm. Collahuasi (Figura 2.9.) (Ireland, 2010).

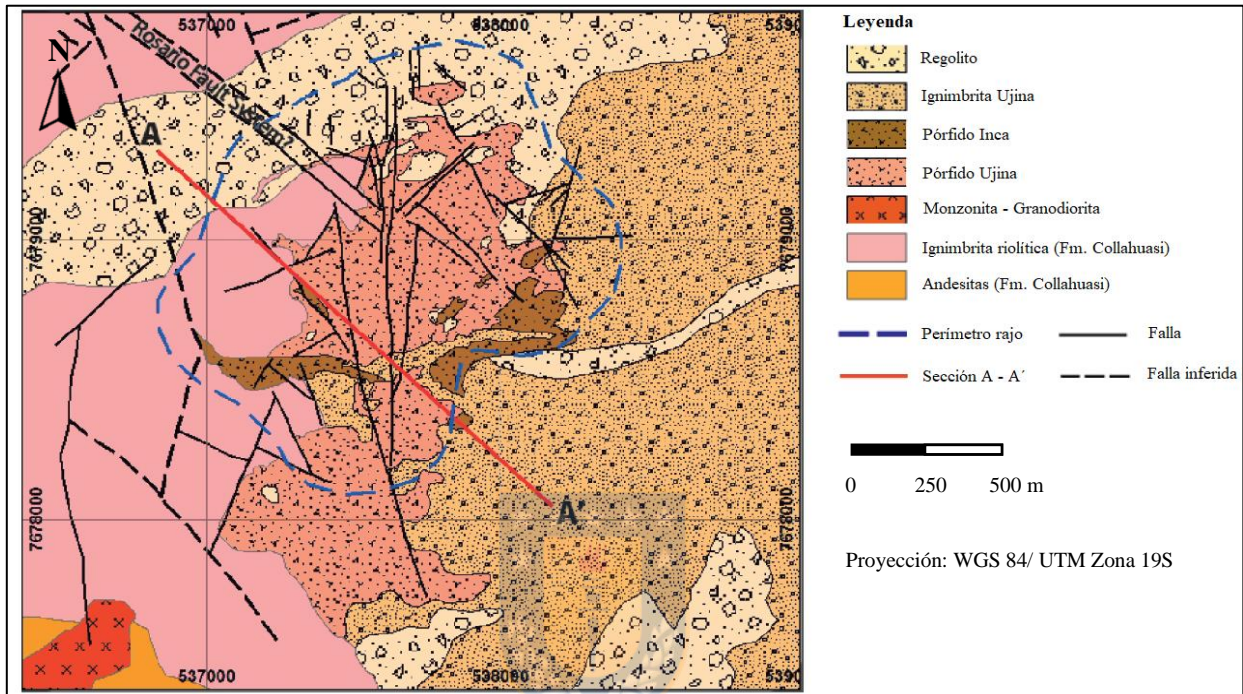


Figura 2.9. Geología del área yacimiento Ujina. Modificado de Ireland, 2010.

2.4.1. Etapa Temprana de Alteración Potásica

Se caracteriza por un núcleo de Kfeld que hacia los bordes grada a una Alteración Biotítica (Figura 2.10.). Se reconoce Cal como mineral accesorio y menas metálicas, tales como Cpy y Bn en vetillas. Cortando a estas, se reconocen vetillas de Qz - Moly, las que a su vez son cortadas por las vetillas de la etapa principal (Masterman et al., 2004).

2.4.2. Etapa Principal de Alteración

Consiste en vetillas de Py - Cpy - Qz envueltas en una alteración de Ill - Chl. La Kaol y Esmec se localizan en parches a lo largo de la parte alta del yacimiento, las que son posiblemente supérgenas. Las zonas de alta ley coinciden con el contacto cilíndrico del pórfido Ujina con la Fm. Collahuasi (Masterman et al., 2004).

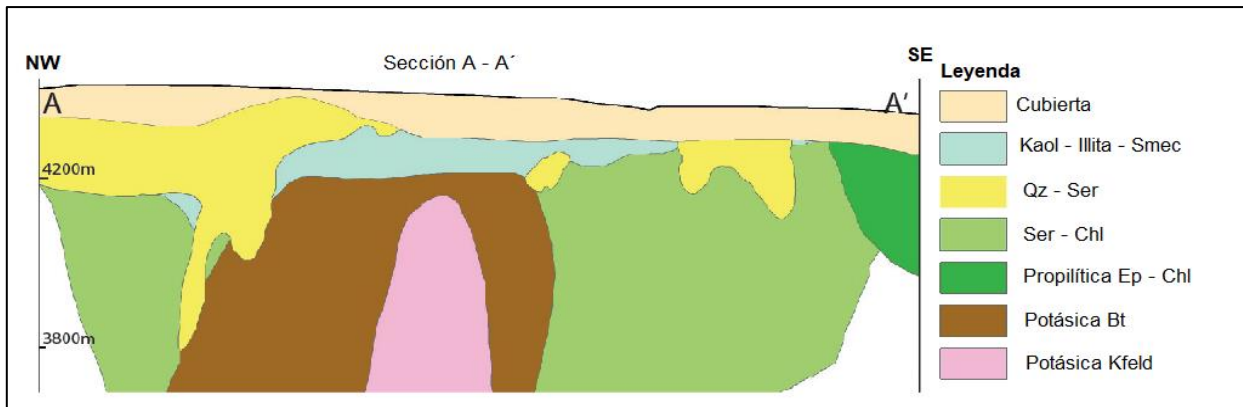


Figura 2.10. Modelo de alteración sección A - A' Ujina. Modificado de Masterman et al., 2004.

2.5. Quebrada Blanca

El yacimiento Quebrada Blanca corresponde a un complejo intrusivo emplazado en la unidad La Grande de la Fm. Collahuasi. Este comprende un *stock* de cuarzomonzonita, pórfidos y brechas (Figura 2.11.), que está caracterizado por una mineralización primaria (Cpy - Bn) asociada a eventos de alteración hidrotermal y un enriquecimiento secundario (Cc - Cv) de alta ley asociado a procesos supérgenos (Barrios, 2015).

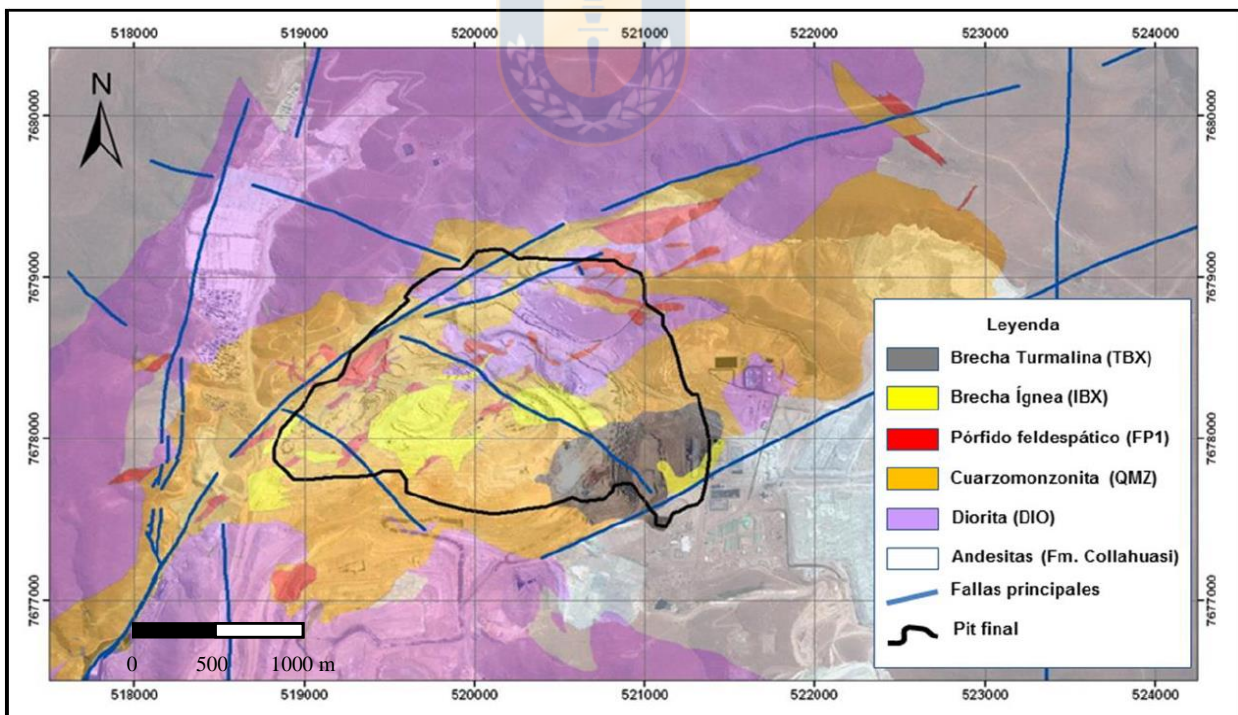


Figura 2.11. Mapa esquemático de la geología del yacimiento Quebrada Blanca. Exploraciones Teck. Extraído de Barrios, 2015.

2.5.1. Alteración Potásica (FK, BIO y GM)

La Alteración Potásica se localiza en la zona centro del depósito con una elongación ENE, desarrollándose en la cuarzomonzonita, brechas ígneas y diques de pórfido feldespático. Se divide en tres facies de acuerdo con su mineralogía de ganga: Kfeld (FK), Bt (BIO) y *Green Mica* (GM) (Figura 2.12.), las cuales están relacionadas a la ocurrencia de vetillas tipo A y B (Barrios, 2015). El dominio FK está asociado a vetillas tempranas tipo A de Qz - Kfeld con cantidades variables de Cpy > Bn > Py. BIO corresponde a la principal alteración hipógena, asociada a vetillas de Qz - Mgt tipo EB, el que posteriormente desarrolló vetillas tipo B de Qz - Moly sin halo y GM está compuesta de Flog, Chl, Ser y abundante Qz coexistiendo con Kfeld y trazas de And y Cor, los cuales ocurren en forma de vetillas de bordes difusos, asociada a Cpy y Py de grano fino diseminada o en cúmulos (Barrios, 2015).

2.5.2. Alteración Fílica (QS)

Se caracteriza por la destrucción parcial o total de los feldespatos y máficos para el desarrollo de Ser, Qz, Py, Cpy ± Chl, la cual se distribuye en todo el depósito. Se asocia principalmente a vetillas tipo D (Barrios, 2015).

En brechas, la sericitización destructiva seguida por disolución produjo cavidades irregulares, esto llevó a los geólogos a clasificarlas como brecha *vuggy*. Eventos mineralizadores posteriores a la formación de las cavidades las rellenaron con sulfuros, en zonas de enriquecimiento supérgeno estas cavidades sirvieron para la acumulación de Cc (Barrios, 2015).

2.5.3. Alteración Argílica (AR)

Representada por la ocurrencia de Arc como la Kaol y Mont, las cuales reemplazan a feldespatos y máficos, imprimiéndole a la roca un aspecto terroso. La alteración se encuentra relacionada a zonas con una fuerte Alteración Fílica (Barrios, 2015).

En el depósito está asociada a procesos supérgenos, pudiéndose encontrar brechas ígneas en la zona de Alteración Fílica alteradas pervasivamente con Kaol. Localmente se pueden apreciar vetillas D con mineralización de Cc y halos de Kaol reemplazando a Ser (Barrios, 2015).

2.5.4. Metamorfismo de Contacto (BIOMET)

En el yacimiento esta alteración se reconoce por la presencia de Bt metasomática, Qz y menor proporción de Py. Generalmente no presenta mineralización (Barrios, 2015).

2.5.5. Alteración Propilítica

Este dominio constituye el halo de alteración más lejano del núcleo potásico. Se caracteriza por una asociación mineral compuesta esencialmente por Chl y Ep (Barrios, 2015).

2.5.6. Alteración Supérgena

Este evento ocurrió previo a la deposición de las gravas terciarias, las que permitieron conservar el nivel enriquecido hasta el presente. La mineralización secundaria se concentró preferentemente en zonas de fracturas y rocas con mayor permeabilidad. Esta consta de oxidados de Cu que no son muy abundantes, suprayacentes a una zona de enriquecimiento secundario compuesta por $Cc \gg Cv$ (Figura 2.13.) (Barrios, 2015).

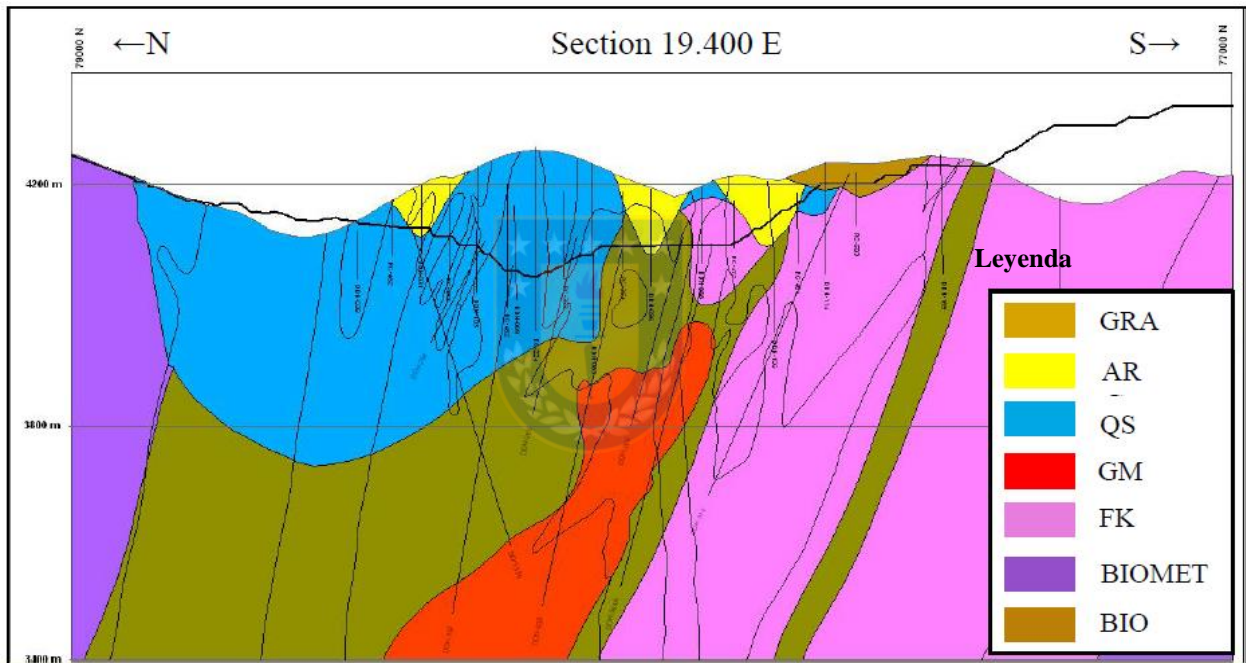


Figura 2.12. Modelo de alteración sección transversal 19400E Quebrada Blanca. GRA: gravas; AR: Argílico; QS: Fílico (cuarzo - sericita); GM: Mica Verde; FK: Feldespato Potásico, BIOMET: Metasomatismo de Contacto; BIO: Potásico de Bt. Extraído de Barrios, 2015.

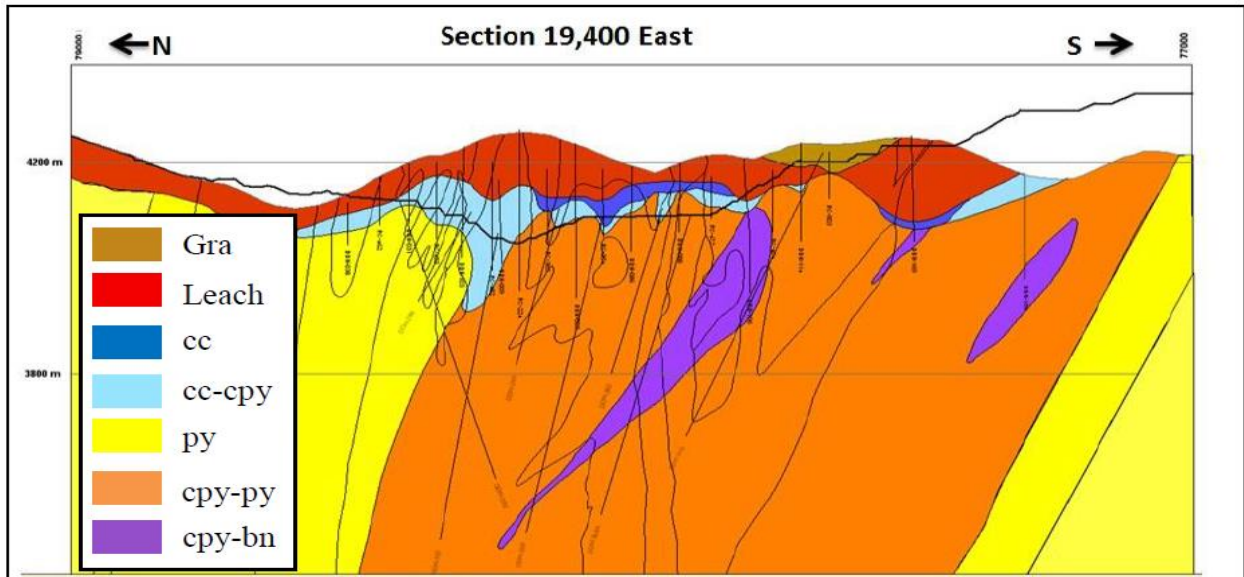


Figura 2.13. Modelo de mineralización sección transversal 19400E Quebrada Blanca. Gra: gravas, Leach: lixiviado. Extraído de Barrios, 2015.

2.6. El Abra

El Abra es un yacimiento de tipo pórfido cuprífero emplazado en un complejo intrusivo, de carácter principalmente diorítico con series hasta graníticas, cuyo último evento correspondió a la intrusión del pórfido cuarzomonzonítico El Abra (Figura 2.14.). El depósito presenta una importante zona de minerales oxidados, sobre un gran cuerpo de sulfuros primarios, existiendo entre ambos una zona de enriquecimiento secundario de poca importancia (Moraga, 2000).

2.6.1. Alteración Potásica

Representada por los dominios Kfeld - Qz - Mgt, Kfeld - Bt - Qz, Bt y brecha de Bt. Estas dos últimas representan una fase tardía de la Alteración Potásica, sobre imponiéndose a los dominios de Kfeld (Ambrus, 1977).

La mineralización primaria se concentra en la diorita El Abra y el pórfido dacítico, relacionándose al incremento en intensidad de la Alteración Potásica. En el pórfido dacítico esta alteración consiste en vetillas de Qz sin halo, vetillas de Kfeld con bajo grado o sin reacción con la roca caja y biotitización de la Hbl (Ambrus, 1977).

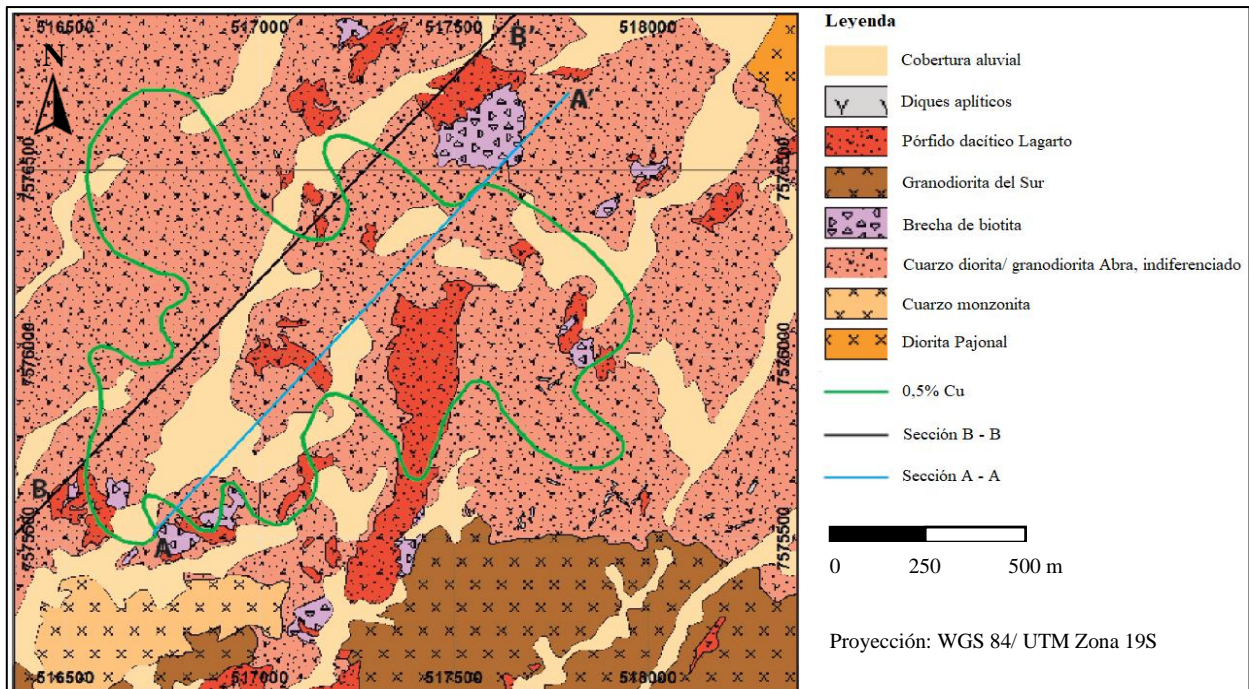


Figura 2.14. Geología del área yacimiento El Abra. Modificado de Ambrus, 1977.

2.6.2. Alteración Fílica

Esta alteración es representada por la asociación Qz - Ser - Py (Figura 2.15.), la cual se dispone controlada por estructuras subparalelas de tendencia WNW - ESE. Estas estructuras constituyen vetillas tipo D, de Qz, acompañada de Py - Cpy y Ena subordinada. El halo sericítico es de varios metros de longitud (Ambrus, 1977).

2.6.3. Alteración Argílica Avanzada

Representada por la asociación Kaol - Pyr, la cual ocurre en forma indiferenciada con la Alteración Fílica en el halo de las vetillas D, además se encuentra sobreimpuesta en gran medida por la Alteración Supérgena (Ambrus, 1977).

2.6.4. Alteración Propilítica

La ocurrencia de esta alteración es pobremente desarrollada, formando un contorno alrededor del depósito de poco espesor, que grada rápidamente a roca fresca o inalterada. La asociación mineralógica representativa corresponde a Chl - Ep - Py (Ambrus, 1977).

2.6.5. Alteración Supérgena

Esta alteración no es claramente diferenciable de la Alteración Fílica y Argílica Avanzada. Se distingue una gran zona de oxidados de Cu, tales como Chry, Atac, pseudo - Mal, Ant y Broc. Una zona mixta con una parte superior compuesta de Chry, Cup, Teno y Cu nativo que grada hacía

la parte inferior con la ocurrencia de Cc (Figura 2.16.). La roca original es totalmente alterada a Kaol y Mont en menor medida (Ambrus, 1977).

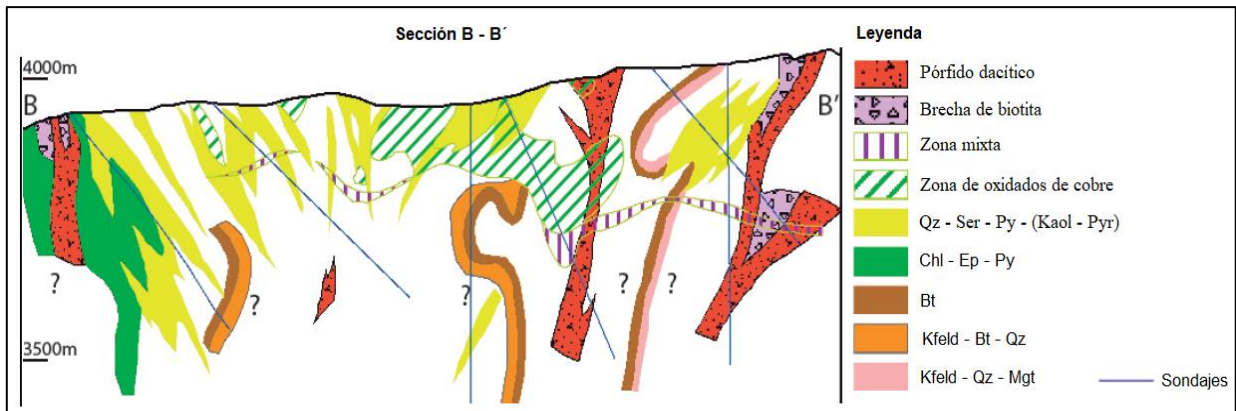


Figura 2.15. Modelo de alteración sección B - B' El Abra. Modificado de Ambrus, 1977.

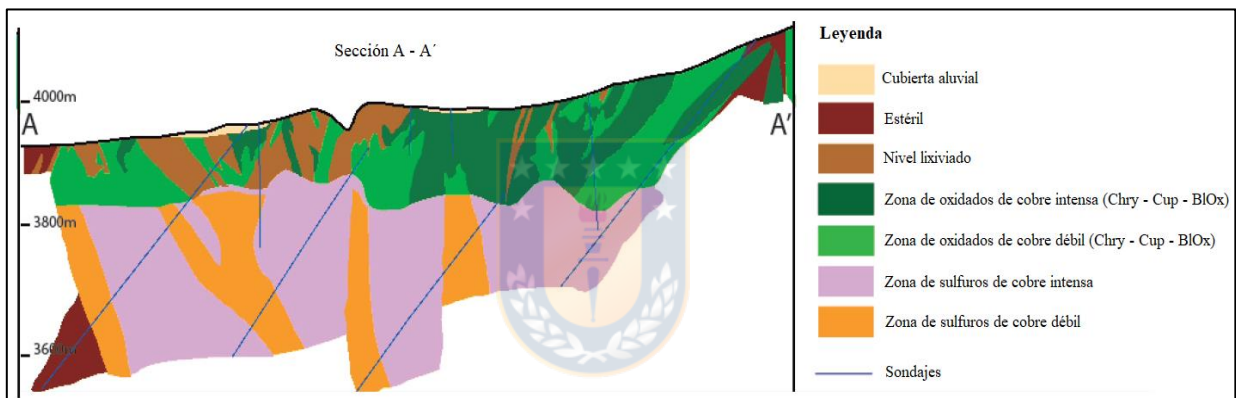


Figura 2.16. Modelo de mineralización del yacimiento El Abra. Modificado de Cavieres, 1975.

2.7. Radomiro Tomic

Radomiro Tomic corresponde a un depósito tipo pórfido cuprífero asociado a la intrusión del Complejo Porfídico Chuquicamata (Fontalba, 2017). El distrito minero de Chuquicamata está caracterizado por poseer un basamento de rocas intrusivas y metamórficas del Paleozoico, un conjunto de rocas estratificadas e intrusivos del Mesozoico, los que son intruidos por cuerpos plutónicos paleógenos, que constituyen la roca caja de la mineralización presente en el distrito. La Falla Oeste es el principal rasgo estructural a nivel regional. Dado sus características se puede dividir el sector en dos bloques, uno oriental y otro occidental (Maksaev et al., 1994 en Fontalba, 2017).

El complejo porfídico Chuquicamata está compuesto por cuatro variedades litológicas: Pórfido Este, Pórfido Oeste, Pórfido Banco y Pórfido Fino (Figura 2.17.) (Cabrera, 2011).

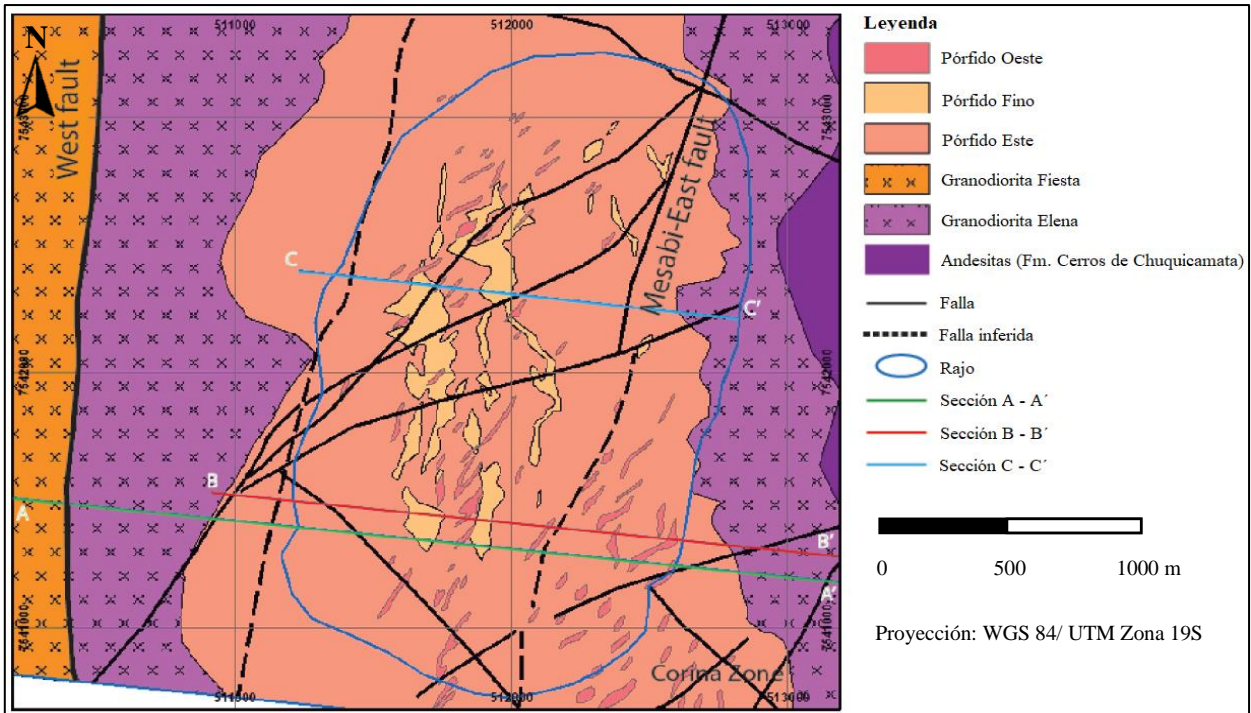


Figura 2.17. Geología del yacimiento Radomiro Tomic. Modificado de Cabrera, 2011.

2.7.1. Potásico de Fondo

Es el evento más temprano de alteración y mineralización, caracterizado por el reemplazo selectivo de los máficos por Bt secundaria y las Plg parcialmente alteradas a Kfeld, el que también se presenta en vetillas y como halo en vetillas A (Barrenechea, 2011 en Fontealba, 2017).

La mineralización ocurre principalmente diseminada y en vetillas (tipo A, B y micas tempranas), consiste principalmente en Bn, Cpy, Dig y en menor grado Esf, Py y Moly. Esta alteración está generalmente asociada a leyes primarias $< 0,35\%$ CuT (Payauna & Parra, 2012 en Fontealba, 2017).

2.7.2. Clorítico Marginal

Equivalente a la Alteración Propilítica, la cual en términos generales se caracteriza por la presencia de Chl con o sin Ep, Alb, Cal, Py y Mgt. Espacialmente es más extensa que la zona Potásica (Barrenechea, 2011 en Fontealba, 2017).

En la Figura 2.18. se representa por la asociación Chl - Ep - (Alb - Py - Carb).

2.7.3. Mica Oscura Temprana (*Early Dark Micaceous*, EDM)

Manifestación del evento tardimagmático, corresponden a vetillas tipo EB (*Early Biotite*: Bt temprana), que se caracterizan por tener bordes irregulares con una sutura de Qz y un halo formado por un agregado fino de Qz, Kfeld, Bt y Ser subordinada (Barrenechea, 2011 en Fontealba,

2017). La mineralización primaria consiste en Bn, Cpy, Dig y en trazas se observa Esf, Py, Moly y Cc primaria (Payauna & Parra, 2012 en Fontealba, 2017).

2.7.4. Sericita Gris Verde (SGV)

Evento transicional entre la actividad tardimagmática y la hidrotermal principal. Generalmente son vetillas de bordes irregulares y se caracterizan por tener un halo irregular de color gris - verdoso, compuesto por un agregado de Ser \pm Qz (Barrenechea, 2011 en Fontealba, 2017). La mineralización principal consiste en Bn - Cpy - Dig - Esf - Tetr y de manera subordinada Cc primaria y Py (Payauna & Parra, 2012 en Fontealba, 2017).

2.7.5. Cuarzo - Sericita Penetrativa

Esta alteración forma parte del evento hidrotermal tardío y consiste en agregados de Ser, Qz y Kaol que reemplazan totalmente a los feldespatos y Bt, resultando en la obliteración de la textura original de la roca. Habitualmente la mena se desarrolla en una sutura y un halo bien desarrollado constituido por un agregado microgranular de Ser - Qz (Barrenechea, 2011 en Fontealba, 2017). La mineralización corresponde a Cpy, Dig, Py, Tetr, Esf y sulfuros secundarios, principalmente en el halo (70%) (Payauna & Parra, 2012 en Fontealba, 2017). Se reconocen vetillas C y D, con Cpy y Py en sutura (Fontealba, 2017).

Este evento es equivalente a la Alteración Fílica en la Figura 2.18.

2.7.6. Argílica Avanzada

Temporalmente posterior a la alteración Cuarzo - Sericítica Penetrativa, dentro de la fase hidrotermal tardía. Se caracteriza por presencia de Arc (Kaol, Pyr, otros), y Alun como minerales principales (Barrenechea, 2011 en Fontealba, 2017). Esta asociación ha sido reconocida en el sector central y en forma muy restringida, no se ha definido mineralización asociada (Briceño, 2011 en Fontealba, 2017).

2.7.7. Alteración Argílica

Corresponde a un proceso principalmente supérgeno, en general las zonas de mayor intensidad de esta alteración se ubican en la parte superior del yacimiento. Su asociación de alteración se caracteriza por la presencia de Arc en general, habitualmente como reemplazo selectivo de diversas intensidades sobre los feldespatos y máficos (Barrenechea, 2011 en Fontealba, 2017). Las Arc predominantes varían según las condiciones físicas y químicas de la alteración pre - existente, es decir, en ambientes más ácidos, donde previamente la roca ha sido alterada a Qz y

Ser, predomina la Kaol, en cambio, cuando las condiciones con más alcalinas y de bajas temperaturas, predominan las Esmec (Fontalba, 2017).

2.7.8. Alteración Supérgena

Se reconocen dos eventos supérgenos principales, el primero corresponde a la primera etapa de oxidación del primario, que consiste en la cementación *in situ* o en fracturas del óxido de Cu principal Atac, con algunos fosfatos y Carb hacia la base. La continuidad de circulación de soluciones más aciduladas y oxidantes, dan origen a la relixiviación de zonas ya oxidadas con la consecuente liberación de Cu para producir el enriquecimiento secundario en profundidad. El segundo evento supérgeno, ocurre probablemente producto del alzamiento del nivel freático, que induce un nuevo evento de oxidación y removilización de la parte alta del sistema, que se refleja en una argilización de la roca de caja con incorporación de minerales tales como las Arc con Cu sobre la Atac y algunos silicatos (Figura 2.19.). La presencia de gravas mineralizadas indica el continuo alzamiento del nivel freático que sobrepasa el contacto grava - roca. En esta etapa es probable que exista un aporte de Cu exótico o removilizado en el mismo sistema (Parra, 2009b, en Fontalba, 2017).

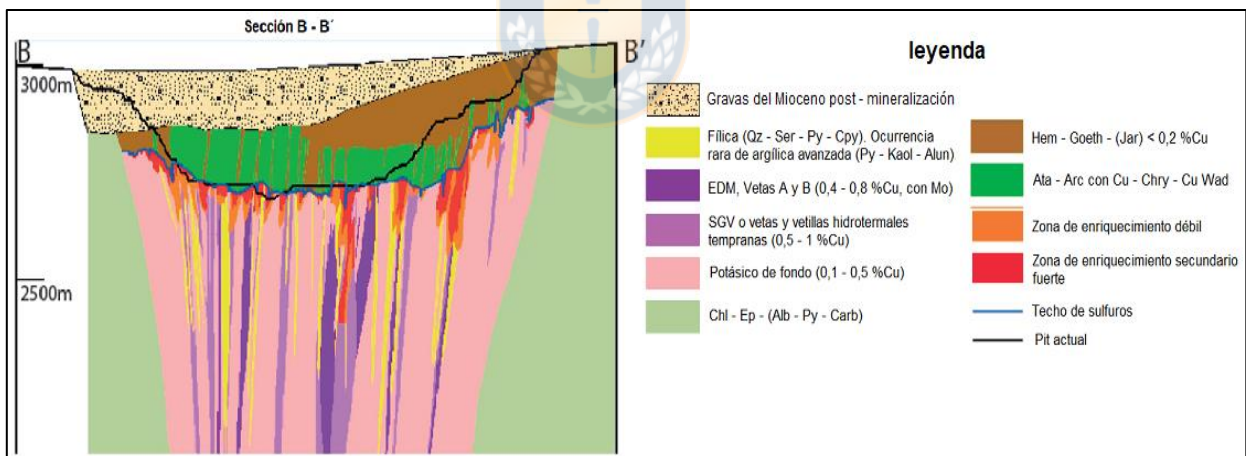


Figura 2.18. Modelo de alteración sección B - B' Radomiro Tomic. Modificado de Parra et al., 2010.

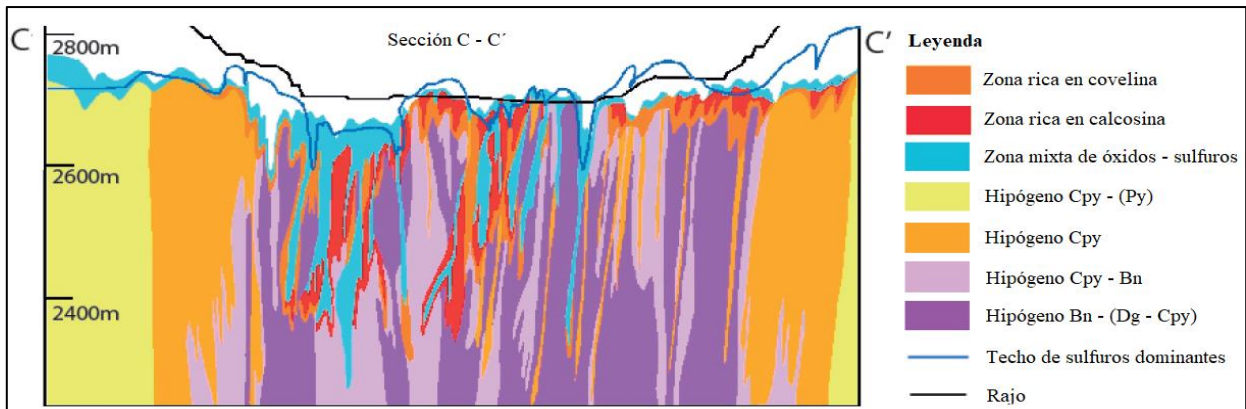


Figura 2.19. Modelo de mineralización sección C -C' Radomiro Tomic. Modificado de Díaz et al., 2009.

2.8. Chuquicamata

Chuquicamata es un yacimiento tipo pórfido cuprífero localizado en un entorno geológico que se caracteriza por la presencia dominante de rocas intrusivas y fallas de importancia regional, además de rocas volcánicas y sedimentarias, conformando una columna geológica discontinua desde el Paleozoico hasta el Cuaternario. El Sistema de Falla Domeyko, incluyendo la Falla Oeste de Chuquicamata, divide el distrito en dos dominios: uno occidental, donde afloran unidades principalmente del Mesozoico al Terciario y uno oriental, en el que predominan rocas del Paleozoico (Figura 2.20.) (Aguilar, 2008).

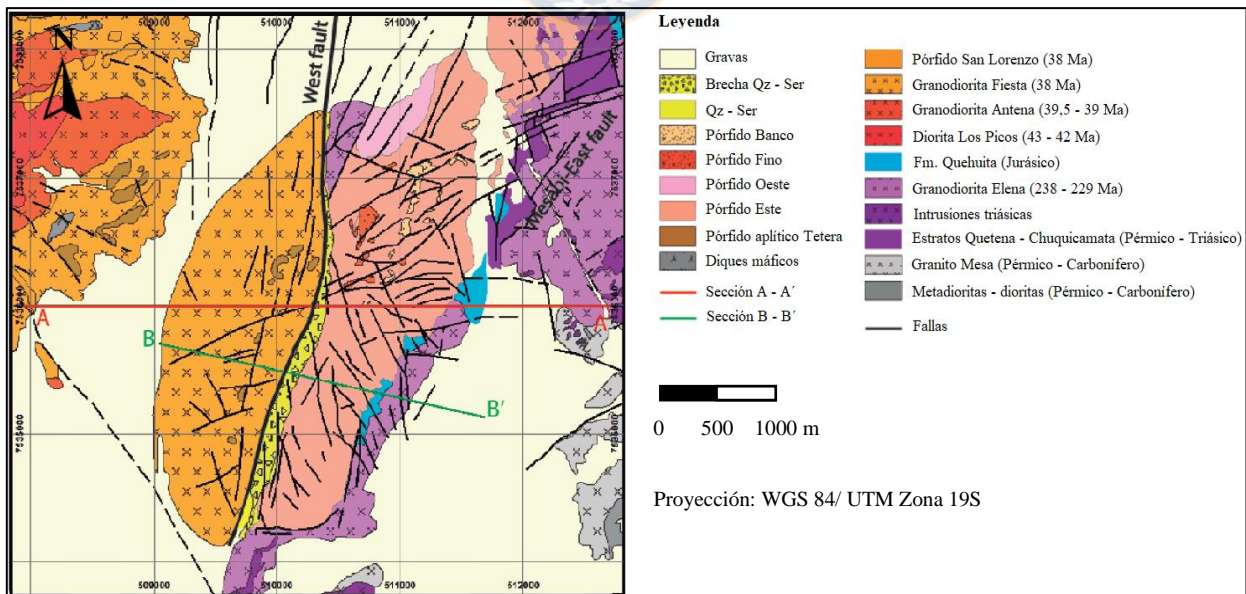


Figura 2.20. Geología del yacimiento Chuquicamata. Modificado de Ossadón et al., 2001 & Rivera et al., 2012.

2.8.1. Potásico de Fondo

Este tipo de alteración temprana se caracteriza por el reemplazo selectivo de máficos del Pórfido Chuquicamata por Bt secundaria, las Plg están albitizadas y además suelen estar parcial y selectivamente alteradas a Kfeld, Ser y/o Arc (Figura 2.21.). La mineralización asociada a esta alteración ocurre predominantemente diseminada y, en menor medida, en microvetillas. La Cpy es el sulfuro predominante y solo localmente puede predominar Bn o Py. En cantidades muy subordinadas se han reconocido otros sulfuros como Dig, Cv, Cc, Esf y Moly (Aguilar, 2008).

2.8.2. Alteración Clorítica

Definida por la cloritización selectiva de los máficos y/o Mgt primaria preservada y/o Hbl primaria fresca, en cualquiera de los casos con textura predominantemente preservada. La albitización selectiva de las Plg y microvetillas de Cal y Ank también son características de este tipo de alteración. La mineralización de baja ley se presenta diseminada con muy bajo volumen total de sulfuros y con la asociación característica $Py \pm Cpy$ (Aguilar, 2008).

2.8.3. Feldespato Potásico - Cuarzo de Grano Fino

Consiste en un reemplazo moderado a intenso de los feldspatos y Bt por Kfeld secundario, en algunos casos acompañado por Alb secundaria y Qz. La mineralización asociada ocurre preferentemente en vetillas y microvetillas y es, por lo general, importante en cantidad y aporte cuprífero, pero de distribución irregular. Las asociaciones características son $Bn \pm Dig \pm Cv$ o bien: $Cpy \pm Cv \pm Bn \pm Dig$ (Aguilar, 2008).

2.8.4. Sericita Gris Verde Temprana

Esta alteración se caracteriza por la fuerte destrucción de la textura original de la roca, debido al reemplazo de los minerales del Pórfido Chuquicamata por un agregado de Ser - Qz, abundantes sulfuros de Cu diseminado y algo de Kfeld. La ocurrencia es en parches pervasivos, de forma irregular o como halos de vetillas tempranas de Qz, Qz - Bn o Qz - Moly. La mineralización asociada se observa finamente diseminada y abundante. Se compone de las mismas asociaciones que Feldespato Potásico - Cuarzo de Grano Fino, pero sin Py (Aguilar, 2008).

Por correlaciones espaciales y temporales, las alteraciones Feldespato Potásico - Cuarzo de Grano Fino y Sericita Gris Verde Temprana se han englobado funcionalmente en una unidad de alteración mayor, que se ha denominado Potásico Intenso (Aguilar, 2008).

2.8.5. Eventos Tardíos de Cuarzo - Sericita con Asociaciones de Alta Pirita

La mayor parte de la mitad W del depósito Chuquicamata consiste en alteración Qz - Ser pervasiva con mineralización característica de alta Py y sulfuros de Cu. Esta alteración consiste esencialmente en agregados de Ser, Qz y Py que obliteran la textura original del pórfido, mediante el reemplazo intenso de los feldspatos y la Bt. También ocurren cantidades menores de Arc del tipo Kaol, reemplazando principalmente a Plg y escasas vetillas localizadas de Alun - Qz. Se distinguen varios pulsos de mineralización sulfurada, que se van superponiendo en el tiempo y espacio: Py - Cpy, Py - Dig (\pm Bn), Py - Cv (\pm Ena), Py - Ena (\pm Esf \pm Ten) (Aguilar, 2008).

2.8.6. Alteración Supérgena

La actividad supérgena originó importantes cambios en la parte más alta del yacimiento, generándose amplias zonas lixiviadas, oxidadas, zonas de enriquecimiento secundario y lixiviación total o parcial de los sulfatos de Ca. Uno de los efectos más notorios y resaltantes de la actividad supérgena en la parte superior del depósito es la lixiviación parcial o total de la Anh y Yes, lo que genera cavidades y fracturas abiertas, aumentando la porosidad y fracturamiento de la roca. El sulfuro secundario más importante en la zona de enriquecimiento es Cc, pero también hay cantidades significativas de Cv secundaria (Aguilar, 2008).

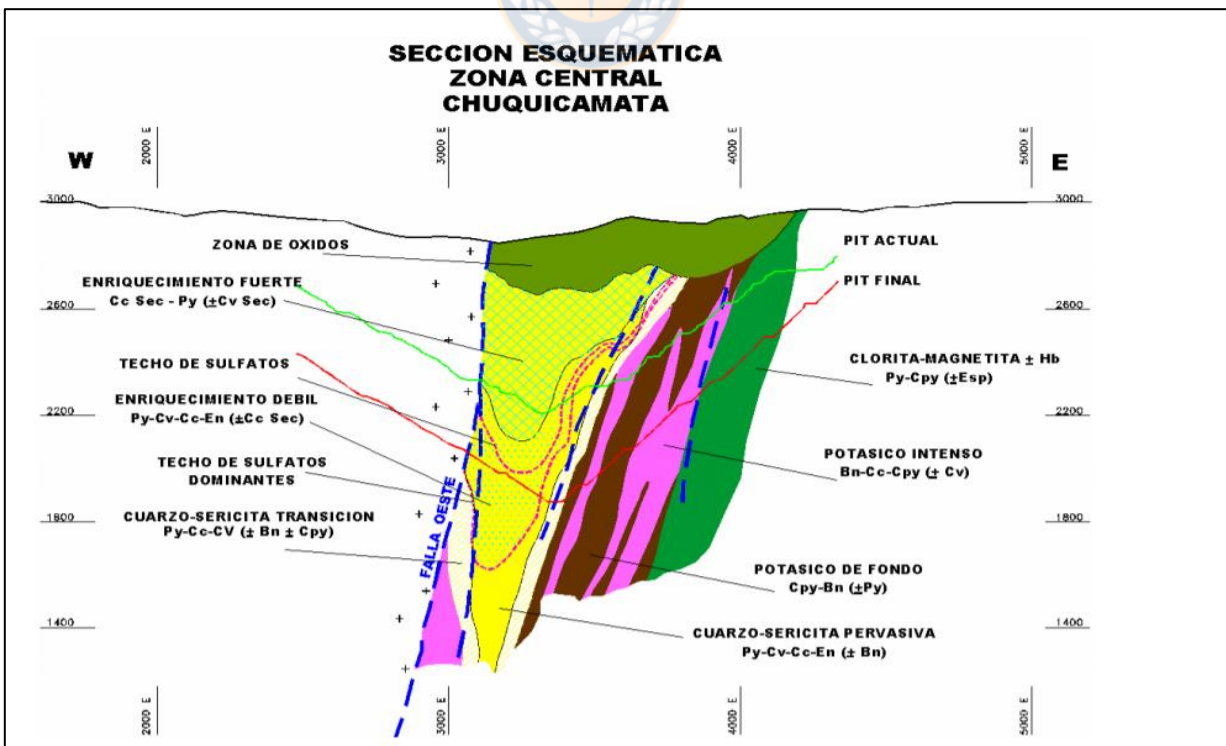


Figura 2.21. Sección esquemática de las unidades de alteración, mineralización y zonas metalogénicas de Chuquicamata. Dirección de Geología, Codelco - Norte. Extraído de Aguilar, 2008.

2.9. Ministro Hales

El yacimiento Ministro Hales corresponde a un depósito tipo pórfido cuprífero con mineralización de Cu y Mo, el cual evoluciona en su parte superior a un sistema epitermal de alta sulfidación, con la formación de brechas hidrotermales con mineralización de Cu y Ag. La geología del yacimiento está condicionada por la Falla Oeste, la cual divide el depósito en dos ambientes geológicos: al lado E predomina el Complejo Metaplutónico de Cerros de Chuquicamata del Carbonífero Superior - Pérmico, la Fm. Collahuasi de la misma edad y la Fm. Calama del Eoceno - Oligoceno; mientras que al lado W, aflora la Granodiorita MM de edad Triásico, el Pórfido MM del Eoceno y brechas hidrotermales del Oligoceno (Figura 2.22.) (Villagrán, 2019).

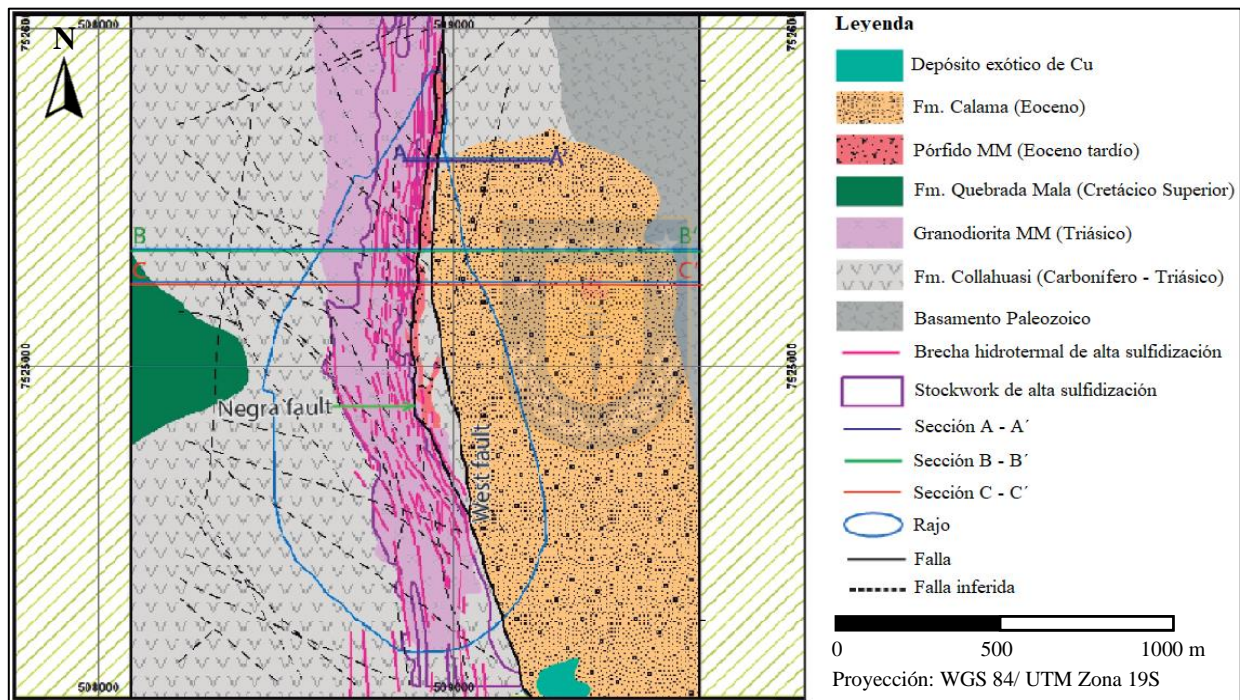


Figura 2.22. Geología del yacimiento Ministro Hales. Modificado de Rivera et al., 2012; Boric et al., 2009 & Becerra et al., 2009.

2.9.1. Mineralización - Alteración Temprana (Tardimagmática)

Este evento ocurre en las zonas más profundas del yacimiento (> 600 m bajo la superficie), asociado al núcleo del Pórfido MM, donde es observada Alteración Potásica con desarrollo de Kfeld, Anh, Ser y Bt secundaria, en menor proporción (Figura 2.23.). Además, se muestran vetillas tipo A, SGV y EDM. La zonación de los sulfuros tempranos se caracteriza por tener un núcleo de Bn, con proporciones variables de Cpy, Py, Id, Dig y Mgt asociada con óxidos primarios como

Hem y Rut. También, se forma Moly en fracturas discontinuas, relacionadas a un tipo de vetillas de Qz aparentemente más tardías que las vetillas tipo A (Díaz, 2010 en Villagrán, 2019).

En la Figura 2.23. esta alteración está representada por la asociación Kfeld - Chl - Ser - Py - Cpy - Hm.

2.9.2. Mineralización - Alteración Hidrotermal Principal (Fílica)

El sistema porfídico es afectado por enfriamiento y reacción con fluidos hidrotermales que se canalizaron siguiendo las zonas de debilidades de las estructuras mayores, paralelas a la Falla Oeste. En esta etapa ocurre destrucción, reemplazo y removilización de los minerales originados durante la etapa temprana. Esta fase está caracterizada por la introducción de Py en vetas y vetillas tipo D, acompañada de una fuerte alteración hidrolítica destructora de Kfeld y Bt. Esta alteración está representada por Ser (Díaz, 2010 en Villagrán, 2019).

En la Figura 2.23. esta alteración está representada por la asociación Ser - Py - Cpy - Bn, Ser - Py - Cpy - Hem y Ser - Py - En.

2.9.3. Mineralización - Alteración Hidrotermal Tardía (Alta Sulfidización)

Esta fase se caracteriza por la generación de brechas hidrotermales a partir de fluidos. Ocurre un enfriamiento del sistema porfídico y una evolución de su estado de sulfidización, lo que es evidenciado a través de las asociaciones de Py - Bn - Dig y Py - Cv que representan altos a muy altos estados de sulfidización. La deposición de Py - Bn - Dig, Py - Ena - Ten - Dig y Py - Cv fue acompañada de una intensa actividad hidrolítica, formando abundante Alun, Sil, Pyr y Kaol con el desarrollo de Alteración Argílica Avanzada (Díaz, 2010 en Villagrán, 2019).

En la Figura 2.23. esta alteración está representada por la asociación Alun - Pyr - Ser - Py - En - Bn - Cc.

2.9.4. Mineralización Supérgena

En fases posteriores, actúan los procesos supérgenos que dan paso a un restringido enriquecimiento secundario y mineralización oxidada de Cu (Figura 2.24.) En este último, son identificadas las especies mineralógicas de carbonatos, silicatos, arseniatos, Arc con Cu y fosfatos (Díaz, 2010 en Villagrán, 2019). En el sector oriental de la Falla Oeste se formó un manto de hasta 50 m de espesor, de oxidados de Cu tipo exótico, el cual se aloja en el contacto entre las gravas aluviales y la Fm. Calama (Díaz y otros, 2017 en Villagrán, 2019).

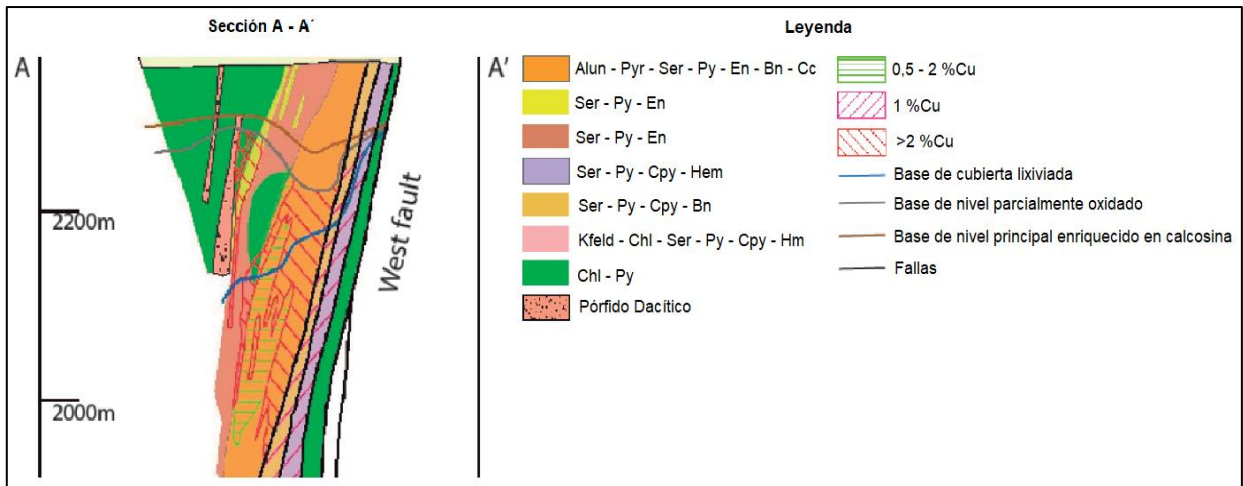


Figura 2.23. Modelo de alteraciones sección A - A' Ministro Hales. Modificado de Sillitoe et al., 1996.

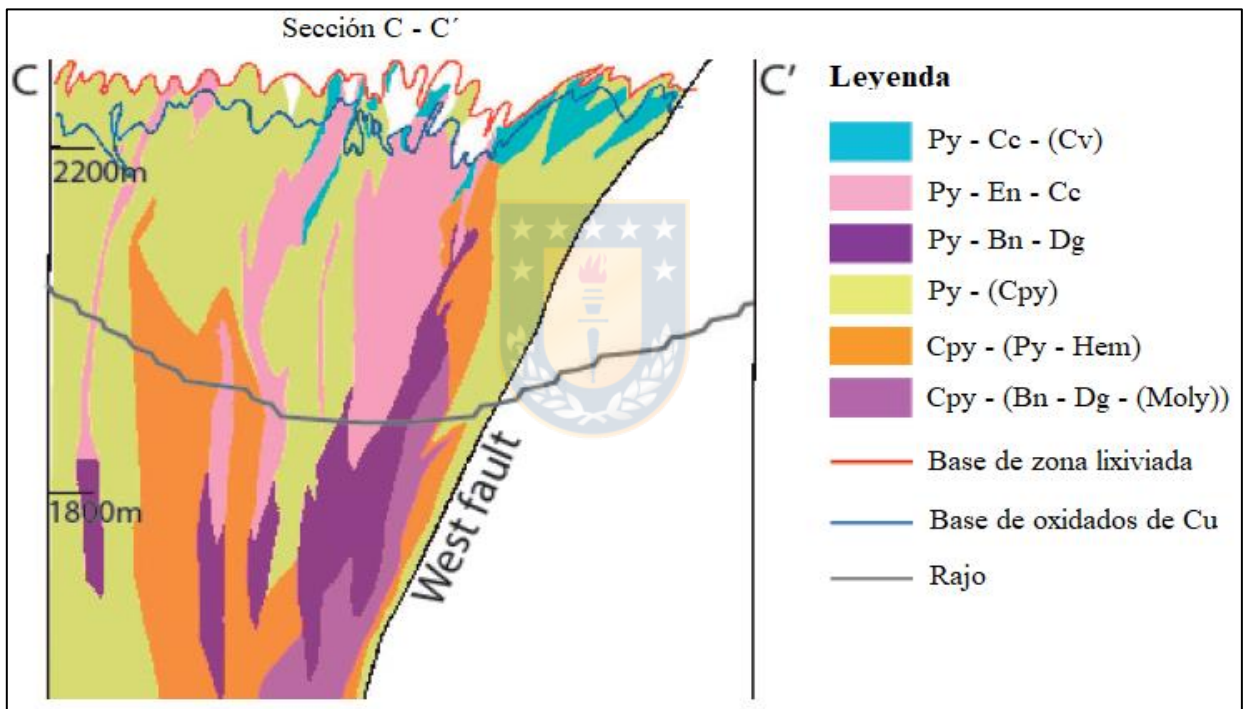


Figura 2.24. Modelo de mineralización del yacimiento Ministro Hales. Modificado de Díaz, 2010.

2.10. Antucoya

El yacimiento Antucoya corresponde a un depósito tipo pórfido cuprífero. Este se encuentra en una zona dominada por rocas sedimentarias y volcánicas dispuestas en forma discordante sobre un basamento metamórfico Devónico, intruidas por rocas plutónicas (Figura 2.25.), que constituyen las raíces del Arco Magmático de La Negra (Mpodosis y Ramos, 1989 en Adriaola, 2021). Todas estas rocas se ven afectadas por el Sistema de Fallas de Atacama, principal rasgo estructural, que controla la ocurrencia de los yacimientos tipo pórfido del área (Adriaola, 2021).

Las litologías del depósito están compuestas principalmente por intrusiones porfídicas del Cretácico (intrusivo granodiorítico, Pórfido Antucoya, Buey Muerto, Tonalítico, Postmineral y cuerpo de brechas) emplazadas en rocas volcánicas jurásicas (Fm. La Negra) (Adriazola, 2021).

2.10.1. Alteración Potásica

Este evento afecta principalmente al Pórfido Antucoya y se evidencia por la presencia de Bt y Kfeld (Lagos et al., 2015 en Adriazola, 2021). Presenta escasas vetillas de Bt tipo EB (*Early Biotite*) asociadas con Mgt y Bn, a las cuales se sobreimpone un denso *stockwork* de vetillas tipo A (Qz, Cpy y Bn), con halos de Kfeld (Ponce et al., 2013 en Adriazola, 2021).

2.10.2. Alteración Clorítica

Se desarrolla principalmente en las andesitas cercanas al borde del Pórfido Antucoya y en el límite con la Alteración Cuarzo - Sericítica de la zona Potásica de éste. Este evento está marcado por el desarrollo de vetillas tipo C formadas por Qz, Bt, Chl, Ser, Mgt y Cpy con halos de Kfeld y Chl (Ponce et al., 2013 en Adriazola, 2021).

2.10.3. Alteración Cuarzo - Sericítica

Se caracteriza por la presencia de vetillas tipo D (Qz, Ser y Py) con suturas de Py y halos de Qz - Ser, que se sobreimponen a las demás vetillas y son el principal aporte de Py en el sistema (Ponce et al., 2013 en Adriazola, 2021).

2.10.4. Alteración Propilítica

Representa el halo más externo de alteración, la mineralogía está compuesta por Chl, Ep y Py en pequeñas cantidades. No se ha reconocido mineralización de Cu en estas rocas (Arellano, 2003 en Adriazola, 2021).

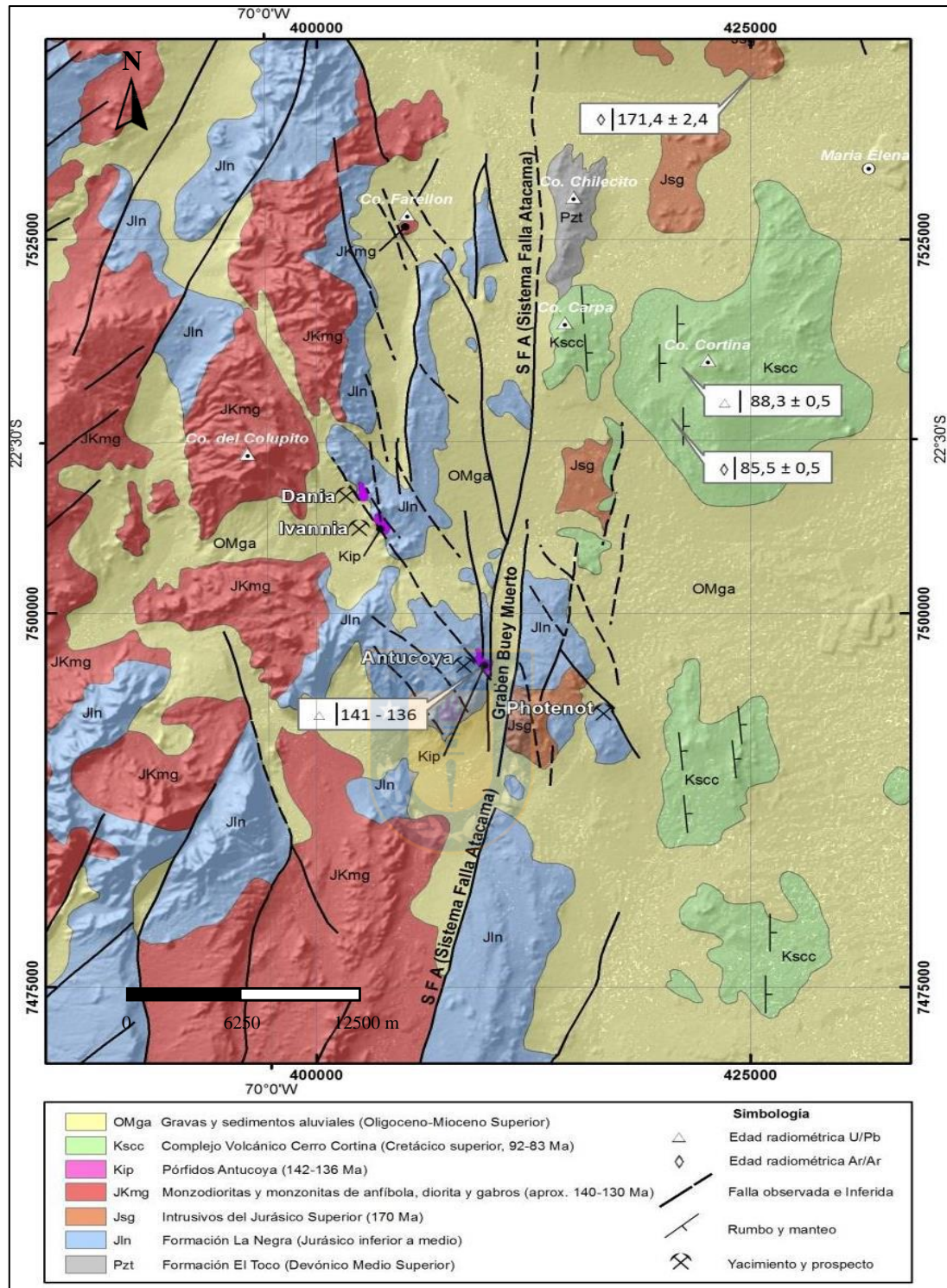


Figura 2.25. Geología del área yacimiento Antucoya. Extraído de Ponce et al., 2013 en Adriazola, 2021.

2.10.5. Alteración Supérgena

En el depósito esta alteración presenta un amplio desarrollo lateral, expresándose en la totalidad del yacimiento (Arellano, 2003 en Adriazola, 2021). En general, los feldespatos se

encuentran reemplazados por Arc (incluyendo Kaol) y Ser, y los minerales máficos a Chl y óxidos de Fe. También existe la presencia de abundantes Lim y sectores con sulfatos e hidrosulfatos de Cu, según la zona de alteración primaria. Este dominio se divide en una zona lixiviada, de oxidados de Cu, mixta y de sulfatos (Figura 2.26.) (Ponce et al., 2013 en Adriaola, 2021).

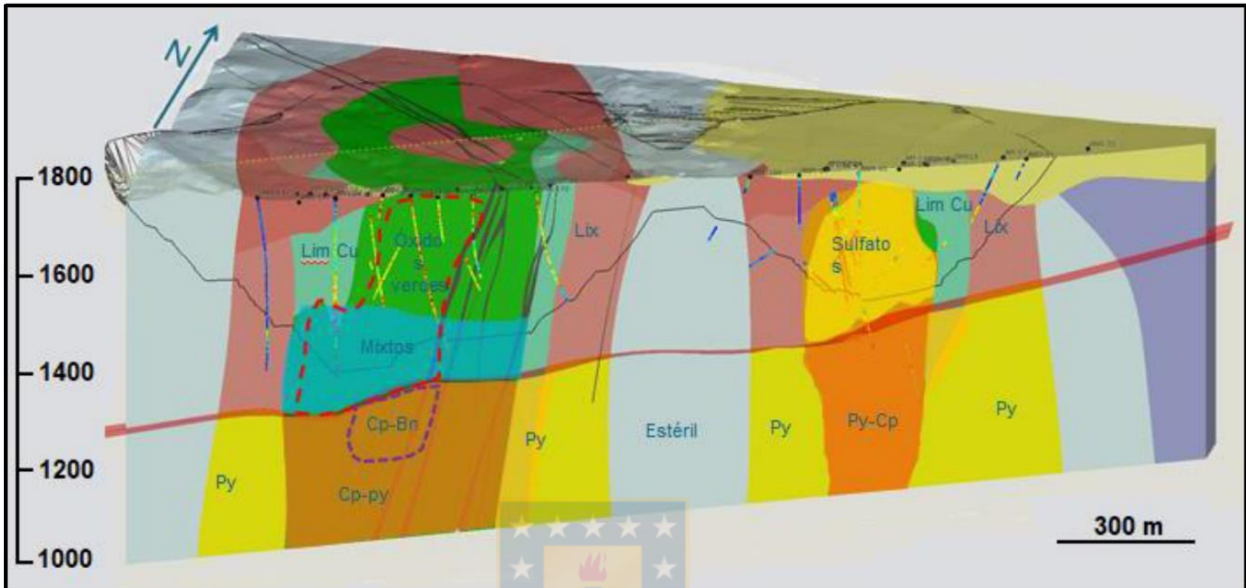


Figura 2.26. Modelo de alteración y mineralización Antucoya. Extraído de Lagos et al., 2015, en Adriaola, 2021.

2.11. Spence

El yacimiento Spence corresponde a un sistema mineralizado del tipo pórfido cuprífero. Este exhibe la zonación característica para este tipo de depósitos: una zona superior lixiviada, una zona de óxidos compuesta principalmente por Atac, un horizonte de mineralización de sulfuros secundarios que sobryace a una mineralización hipógena reconocida en al menos 600 m de profundidad. Esta última está relacionada a la intrusión de una serie de pórfidos de composición cuarzomonzonítica a granodiorítica, los cuales se emplazan en rocas sedimentarias pertenecientes a la Fm. Cerritos Bayos, de edad Jurásico (Moreno et al., 2012). Estas unidades ígneas también afectan a las rocas volcánicas a volcanoclásticas de la Fm. Quebrada Mala (Figura 2.27.) (Rabajille, 2010).

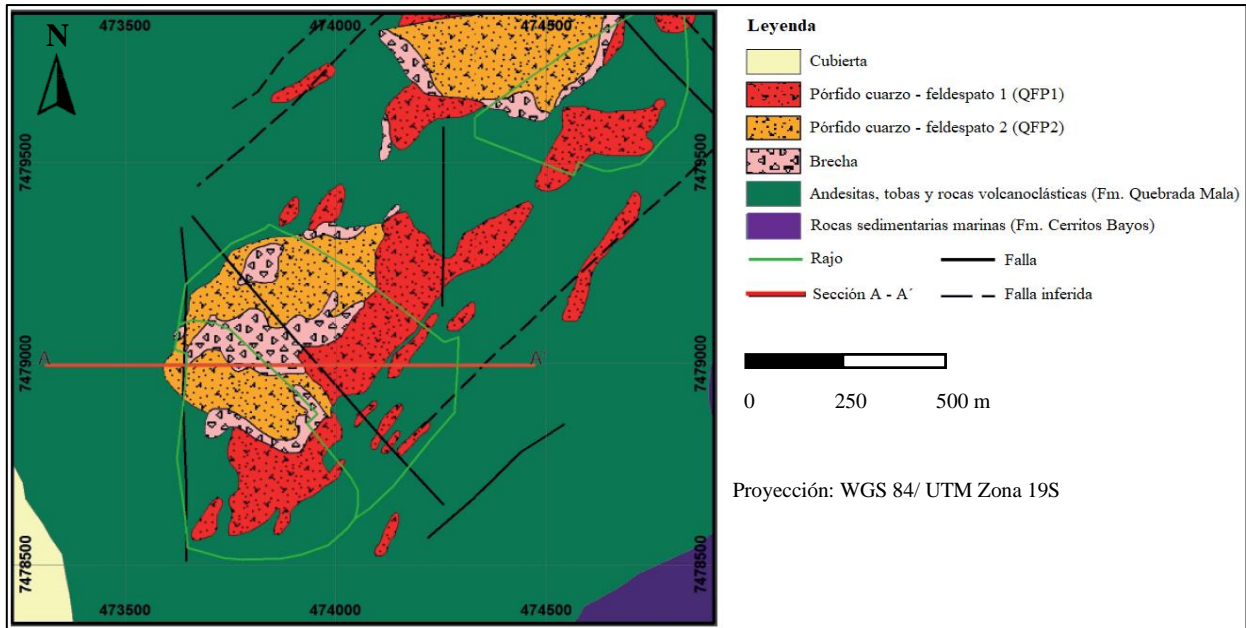


Figura 2.27. Geología del yacimiento Spence. Modificado de Rabajille, 2010.

2.11.1. Alteración Potásica

Corresponde a la alteración hipógena predominante, caracterizada por la presencia de Bt secundaria y Kfeld en profundidad (Figura 2.28.). La mineralización asociada es Cpy - Py (Moreno et al., 2012).

2.11.2. Alteración Fílica

Se dispone en sobreimposición de la Alteración Potásica en los niveles hipógenos menos profundos, caracterizada por la asociación Qz - Ser - Py. Además, tiende a profundizarse a través de las estructuras principales del depósito. La mineralización asociada es Cpy - Py, observándose un mayor contenido en volumen de Py con respecto a la Alteración Potásica (Moreno et al., 2012).

2.11.3. Alteración Propilítica

Ubicada hacia la periferia del depósito. Está representada por la ocurrencia de las asociaciones Chl - Py y Chl - Ep - Py (Rabajille, 2010).

2.11.4. Alteración Argílica

Presente en la parte superior del depósito. Expresada en la ocurrencia de la asociación Qz - Musc - Kaol - Ill (Rabajille, 2010).

La Figura 2.29. representa el modelo de mineralización del yacimiento Spence.

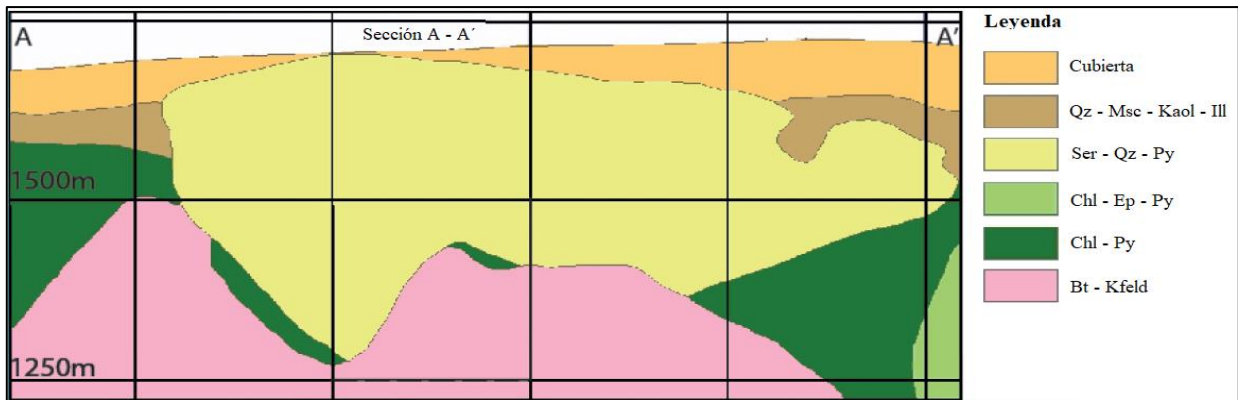


Figura 2.28. Modelo de alteraciones Sección A - A' Spence. Modificado de Rabajille, 2010.

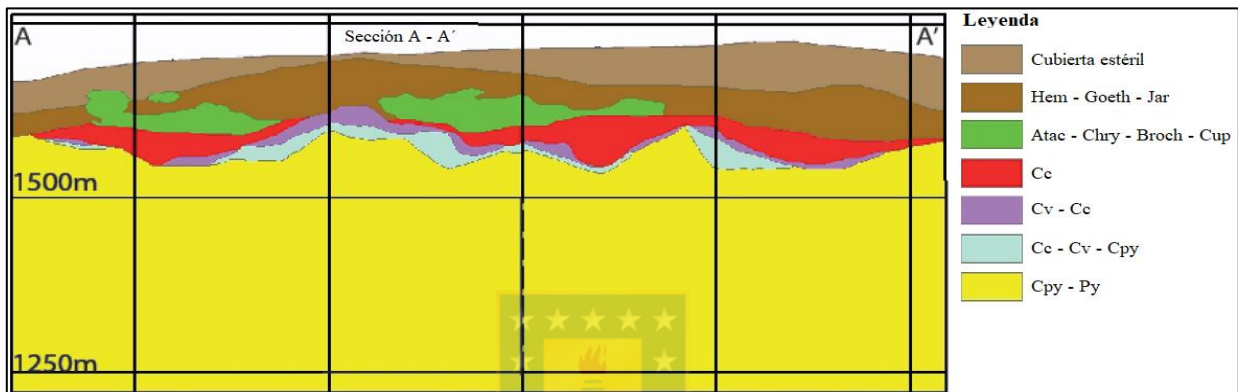


Figura 2.29. Modelo de mineralización Sección A - A' Spence. Modificado de Rabajille, 2010.

2.12. Sierra Gorda

El yacimiento Sierra Gorda corresponde a un depósito tipo pórfido cuprífero compuesto por un batolito de composición granodiorítica a monzonítica intruidos por pórfidos granodiorítico y feldespático, que luego da paso a la ocurrencia de brechas ígneas e hidrotermales. El yacimiento está hospedado en rocas volcánicas con intercalaciones de rocas sedimentarias pertenecientes a la Fm. Quebrada Seca del Cretácico Superior (Figura 2.30.). La mineralización es principalmente hipógena con Cpy - Mo, escasa Bn y Au asociado a *stockwork* de Qz (Quadra Mining, 2009).

2.12.1. Alteración Potásica

Esta alteración está relacionada a la etapa tardía de la intrusión de los cuerpos porfídicos. Se expresa principalmente con la ocurrencia de Bt secundaria (Quadra Mining, 2009).

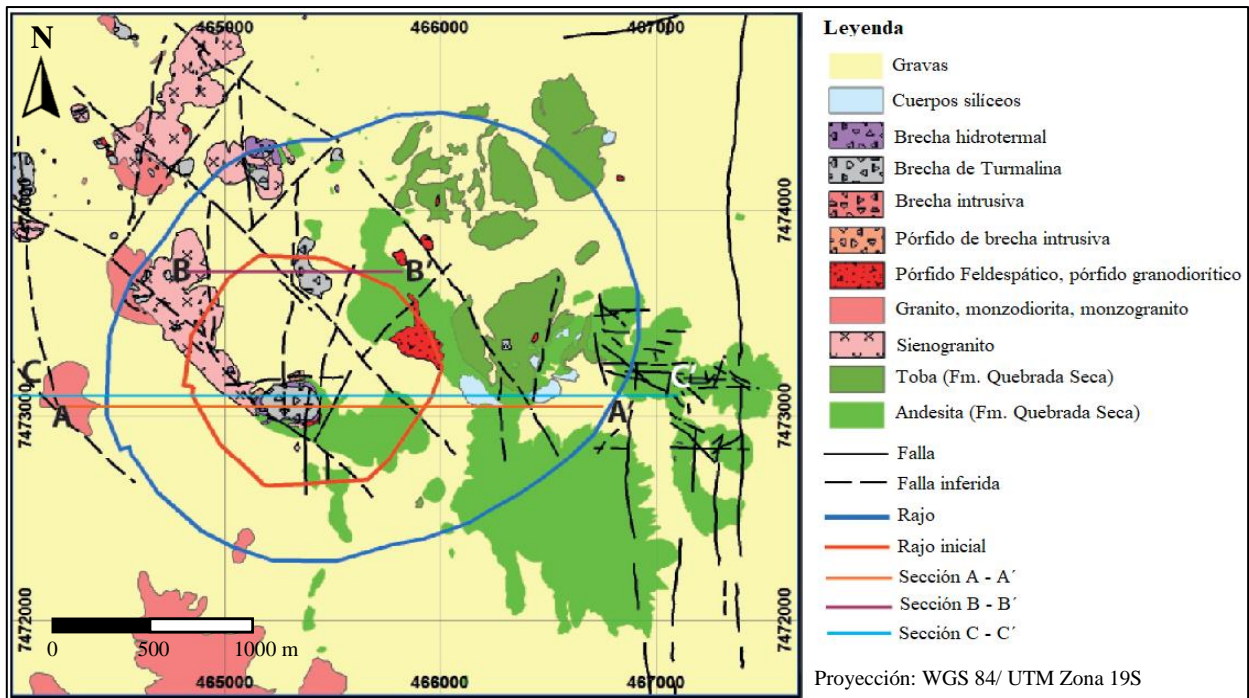


Figura 2.30. Geología del yacimiento Sierra Gorda. Modificado de Quadra Mining, 2009.

2.12.2. Alteración Fílica

Corresponde a la alteración dominante relacionándose al centro mineralizado (Figura 2.31.). Se identifica por el reemplazo de los feldespatos a Ser y en menor medida Qz. Se observa en la matriz de las brechas (Quadra Mining, 2009).

2.12.3. Alteración Argílica

Presente en la parte oeste del depósito, rodeando a la Alteración Fílica. Consiste en Qz con minerales de Arc en los intersticios (Quadra Mining, 2009)

2.12.4. Alteración Propilítica

Corresponde a un halo de Chl y Ep ubicado en la periferia del depósito (Quadra Mining, 2009).

2.12.5. Alteración Supérgena

En el depósito exhibe un desarrollo poco importante. Se expresa en la ocurrencia de oxidados de Cu y sulfuros secundarios de Cu (Quadra Mining, 2009).

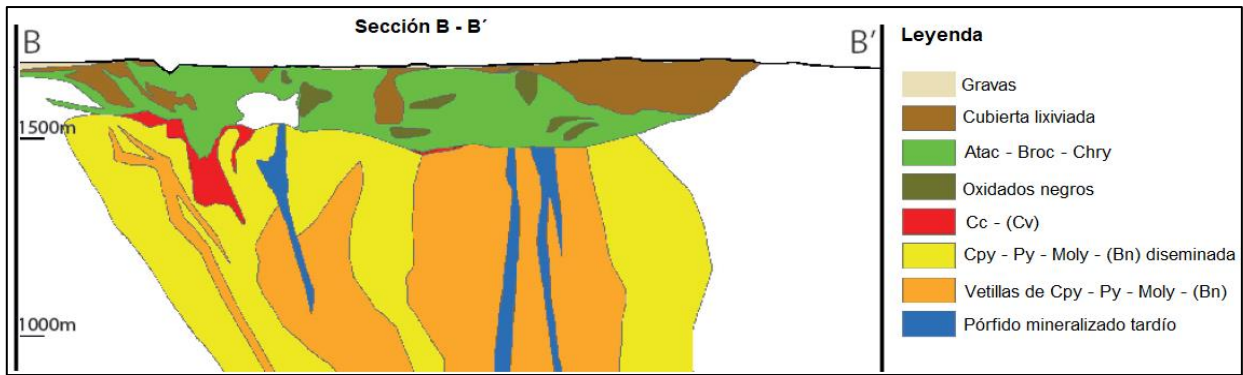


Figura 2.31. Modelo de mineralización Sección B - B' Sierra Gorda. Modificado de Quadra Mining, 2009.

2.13. Esperanza (Distrito Centinela)

Esperanza es un depósito tipo pórfido cuprífero constituido por una serie de cuerpos porfídicos controlados estructuralmente, de composición granodiorítica que intruyen a una secuencia masiva de andesitas intercaladas con rocas volcanosedimentarias calcáreas de la Fm. Quebrada Mala del Cretácico tardío (Figura 2.32.). Las estructuras regionales son predominantemente de tendencia N - NE, pertenecientes al Sistema de Fallas de Domeyko (Perelló et al., 2004).

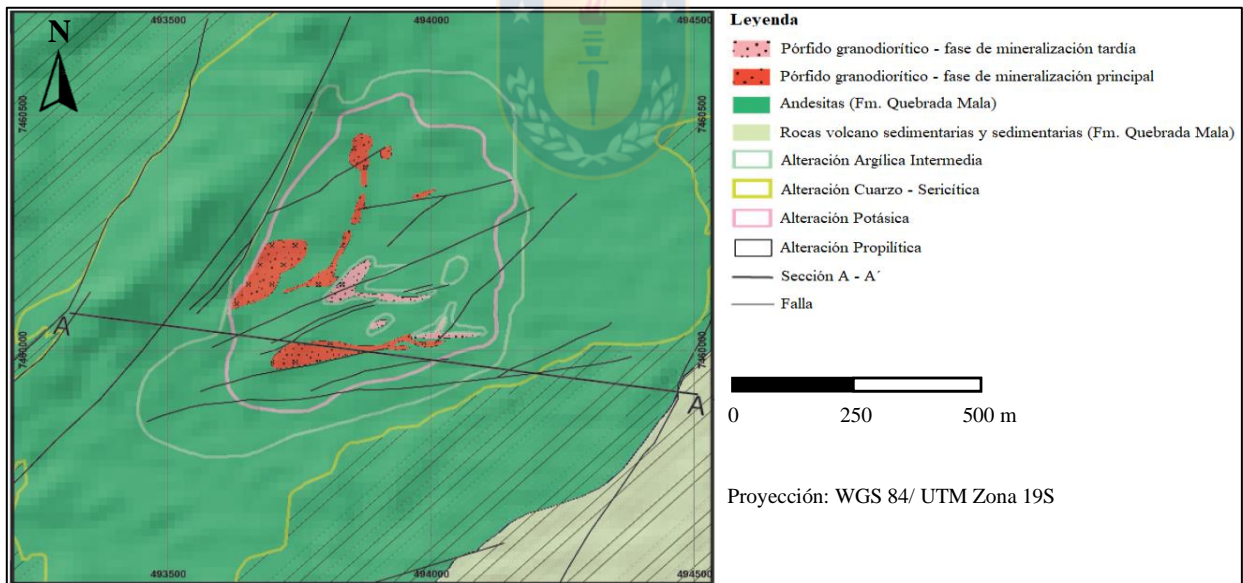


Figura 2.32. Geología del yacimiento Esperanza. Modificado de Perelló et al., 2004.

2.13.1. Alteración Potásica

Representada por la ocurrencia de vetillas tipo A: Qz - Kfeld - Anh - Mgt - Cpy - Bn de espesor que varía de milímetros a centímetros, irregulares y discontinuas. Como también tipo B: Qz - Kfeld - Bt con Anh - Mgt - Cpy - Bn intersticial, planares y continuas con un halo incipiente de Kfeld - Bt, posee trazas de Moly (Perelló et al., 2004).

2.13.2. Alteración Cuarzo - Sericítica

Caracterizada por la ocurrencia de vetillas tipo D: Qz - Py y Ser \pm Py como halo (Figura 2.33.), planares de tamaño centimétrico a decimétrico (Perelló et al., 2004).

2.13.3. Alteración Propilítica

Representa el borde externo del yacimiento, con la ocurrencia de Chl - Ep - Py - Carb (Bisso et al., 2009).

2.13.4. Alteración Supérgena

Representada por mineralización oxidada de Cu, la cual se distribuye en los primeros 200 metros bajo la superficie y está dominada por Atac, con cantidades menores de Chry, Broc, Samp y algunos sulfatos y fosfatos. El enriquecimiento secundario de sulfuros es débil y de poca extensión, limitándose a la presencia de Cc y Cv (Figura 2.34.) junto a sulfuros primarios directamente en el techo de sulfuros (Bisso et al., 2009).

2.13.5. Alteración Argílica Intermedia

Se identifica por la ocurrencia de vetillas de Qz - Py - Cpy con halo de Ser en la parte interna y Chl - Ser en la parte externa. Py > Cpy en el halo (Perelló et al., 2004).

Dentro de esta alteración se ha reconocido también Esmec e Ill (Bisso et al., 2009).

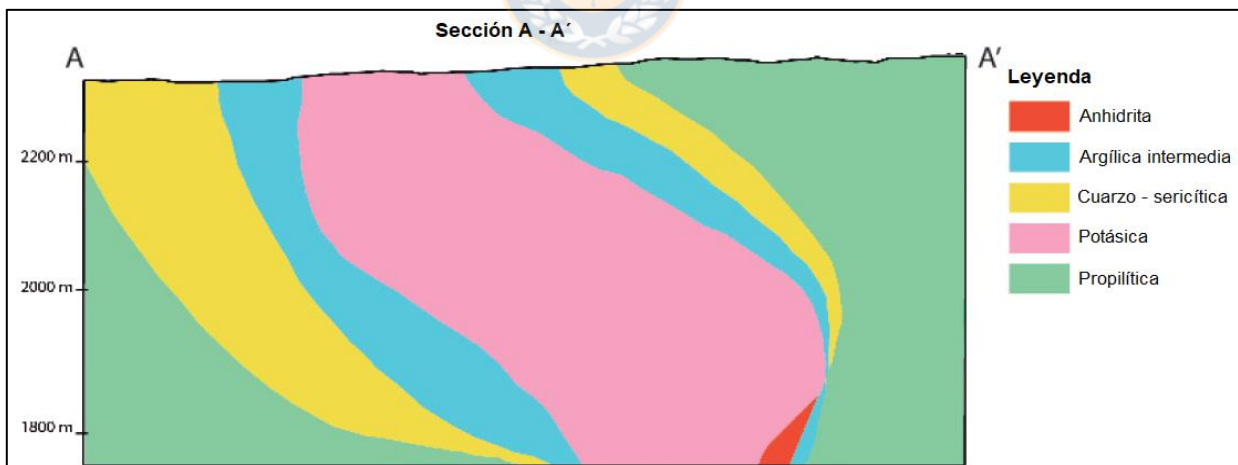


Figura 2.33. Modelo de alteración Sección A -A' Esperanza. Modificado de Perelló et al., 2004.

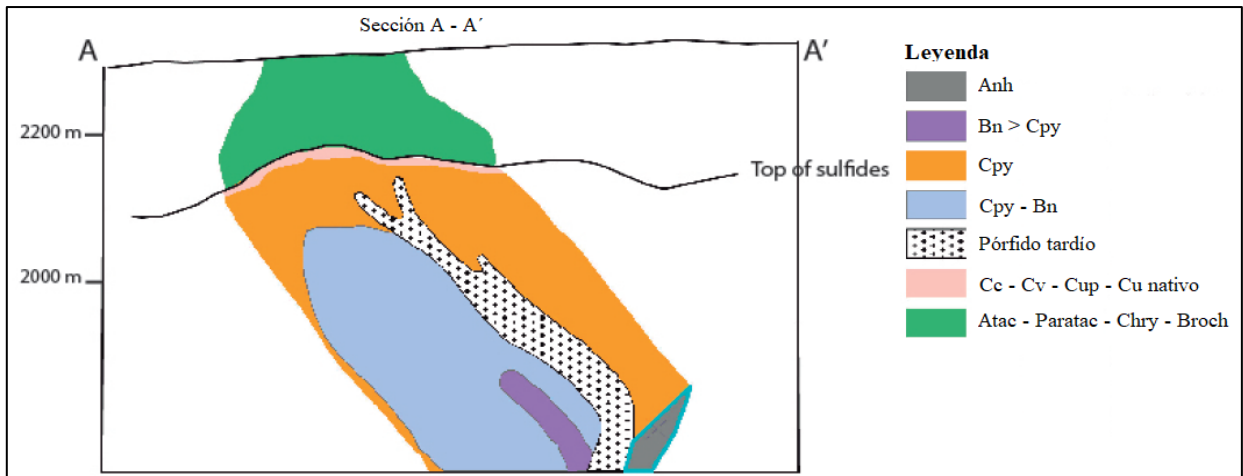


Figura 2.34. Modelo de mineralización Sección A - A' Esperanza. Modificado de Perelló et al., 2004.

2.14. El Tesoro (Distrito Centinela)

Corresponde a un depósito tipo exótico alojado en gravas, el cual consiste en Chry, *copper wad*, Atac, para - Atac, Qz, ópalo y Cal (Fernández - Mort et al., 2017).

La Figura 2.35. representa un modelo esquemático para este tipo de depósitos.

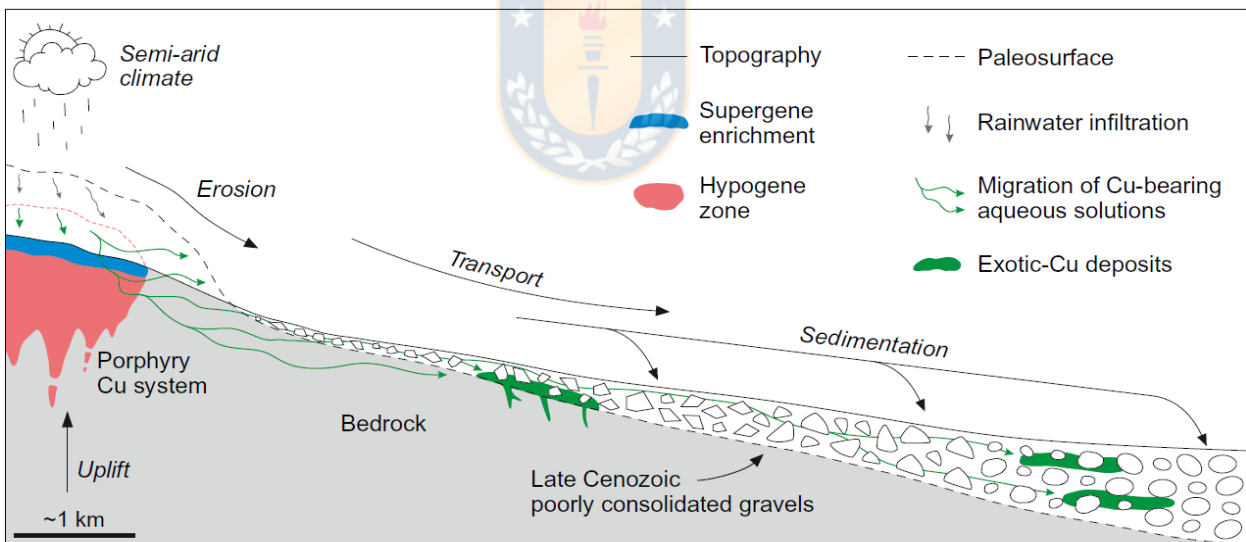


Figura 2.35. Modelo de depósito exótico de Cu. Basado en Münchmeyer, 1996 & Sillitoe, 2005 en Fernandez - Mort, 2017.

2.15. Gabriela Mistral

Gabriela Mistral corresponde a un depósito tipo pórfido cuprífero de geometría elíptica con dimensiones de 1,5 km (EW) y 2 km (NS), con un espesor promedio de 150 m. El pórfido Gaby Sur es de composición diorítica, asociado a un cuerpo intrusivo brechizado polimictico con fragmentos predominantemente de composición granodiorítica a tonalítica. La roca caja consiste

en granodiorita y tonalita pertenecientes al Complejo Intrusivo Pampa Elvira (Figura 2.36.). Este Complejo intruye a secuencias volcanosedimentarias del Pérmico - Triásico correlacionadas con la Fm. Quebrada Escondida y Fm. Del Bordo (Camus, 2003).

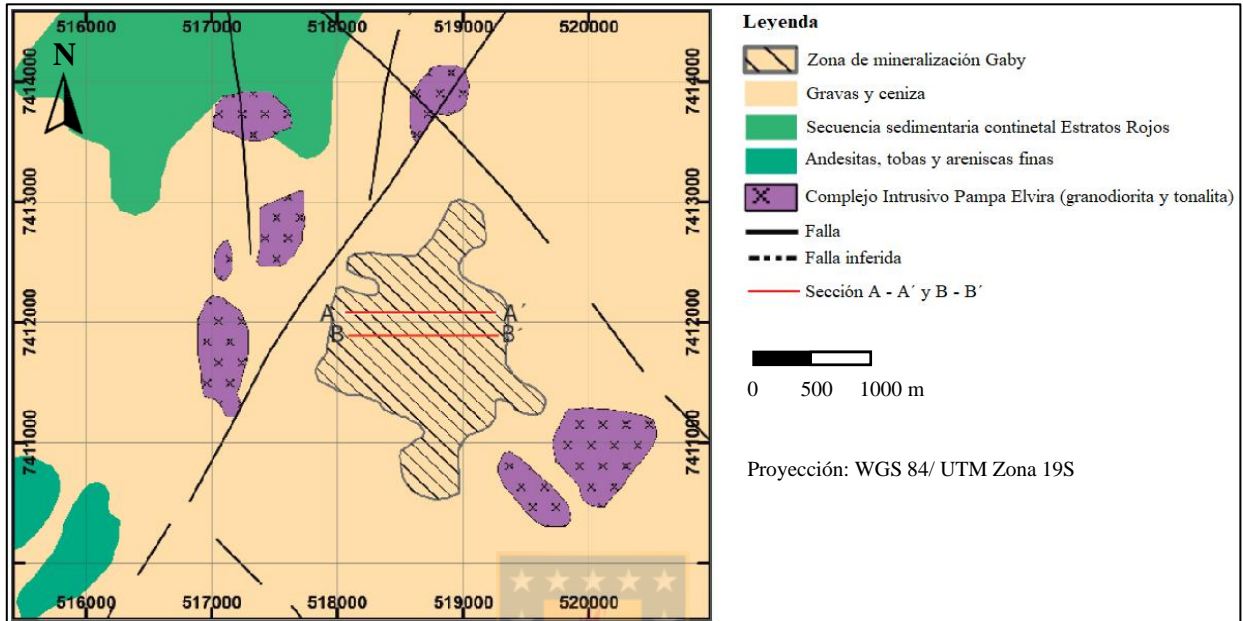


Figura 2.36. Geología del yacimiento Gabriela Mistral. Modificado de Camus, 2003.

2.15.1. Cuarzo - Biotita

Representada por la ocurrencia de vetillas tipo A: Qz - Cpy - Bn - Py, EB: Bt y B: Qz - Cpy - Bn - Py (Figura 2.37.) (Camus, 2001).

2.15.2. Clorita - Albita - Sericita

Caracterizada por la ocurrencia de vetillas tipo C: Cpy - Py - Chl - Alb con Ser como halo. También vetillas tipo D: Py - Cpy - con Ser como halo (Camus, 2001).

2.15.3. Alteración Supérgena

Representada por la asociación Kaol - Esmec - Alun y la ocurrencia de una importante zona de oxidados de Cu, tales como: Chry, Neot, Atac y Mal (Figura 2.38.) (Camus, 2001).

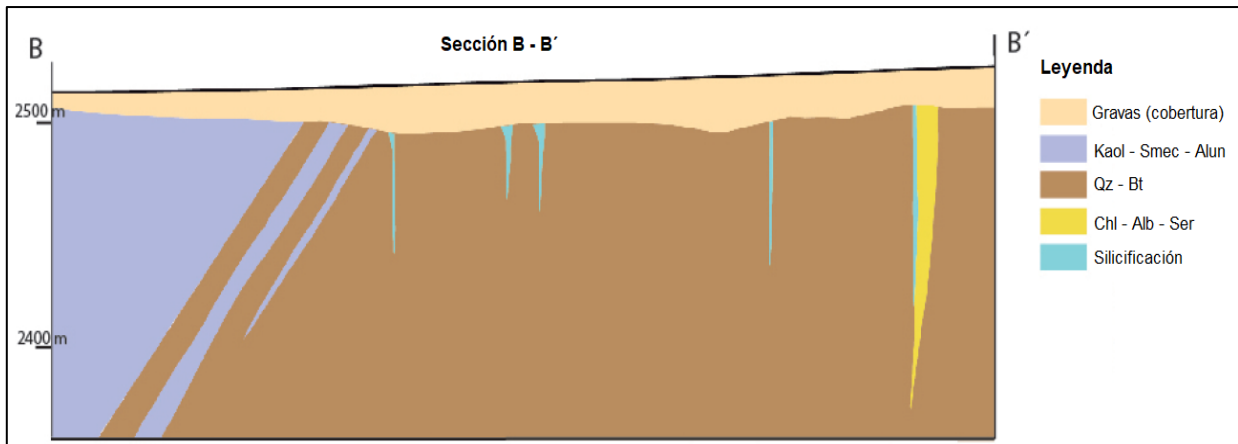


Figura 2.37. Modelo de alteración Sección B - B' Gabriela Mistral. Modificado de Camus, 2001.

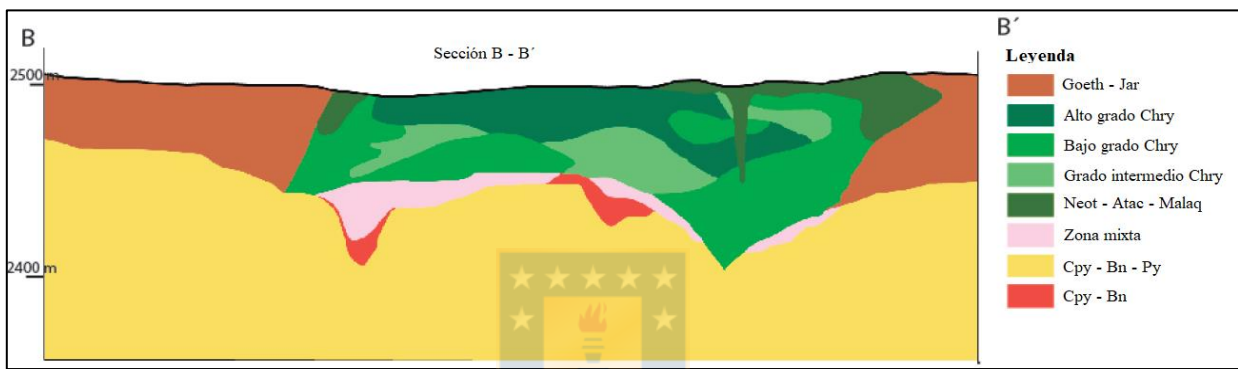


Figura 2.38. Modelo de mineralización Sección B - B' Gabriela Mistral. Modificado de Camus, 2001.

2.16. Lomas Bayas

Lomas Bayas corresponde a un depósito tipo pórfido cuprífero asociado a brechas hidrotermales inserto en la unidad intrusiva Batolito San Cristóbal, de edad Cretácico Superior. Estructuralmente este depósito está relacionado a la Zona de Falla San Cristóbal, con movimientos dextrales, desarrollo de dúplex extensionales y generación de estructuras subverticales de comportamiento transcurrente normal e inverso (Vega et al., 2009).

2.16.1. Alteración Potásica

Subdividida en tres etapas, K1, K2 y K3, con Bt o Kfeld dominante, en facies que son acompañadas generalmente por Tur. Las vetillas asociadas a K1 son de Bt > Qz. K2, se caracteriza por la abundante ocurrencia d Kfeld en reemplazo y vetillas. K3 corresponde a un evento con débil y local ocurrencia de Kfeld ± Bt ± Alb. La mineralización asociada corresponde a Cpy > Py > Moly > Bn (Vega et al., 2009).

2.16.2. Alteración Clorítica

Consiste en la asociación Chl - Qz \pm Ep \pm Carb, con ocurrencia en pátinas, vetillas y reemplazo parcial de Bt y Hbl primaria y menor proporción de Plg. Corresponde al evento con menor aporte de sulfuros, Py > Cpy (Vega et al., 2009).

2.16.3. Alteración Cuarzo - Sericita

Subdividida en CS1 y CS2, sobreimponiéndose a los eventos Potásico y Clorítico. CS1 corresponde a un evento pervasivo con fuerte Ser, Qz secundario y leves cantidades de Tur, en asociación con vetas de Qz masivo de grano grueso y sulfuros Py \pm Cpy > Moly, con ocurrencia de halos sericíticos \pm Chl. CS2 corresponde al emplazamiento de la unidad Veta Andacollo, compuesta por Qz masivo y débil halo sericítico, con bajo aporte de sulfuros \pm Cpy > Py >Moly (Vega et al., 2009).

2.16.4. Alteración Argílica Supérgena

Caracterizada por la ocurrencia de Arc y óxidos de Fe y Mn, con intensidades variables, sobreimponiéndose y profundizando en zonas de fallas o fuerte fracturamiento. De esta manera los procesos supérgenos habrían originado a lo menos dos etapas de lixiviación y oxidación (Cu verde), formando localmente zonas de enriquecimiento secundario (Vega et al., 2009).

2.17. Fortuna de Cu (Lomas Bayas II)

Fortuna de Cu corresponde a un depósito tipo pórfido cuprífero, el cual se origina en un ambiente subvolcánico en donde el emplazamiento de los eventos mineralizadores, Pórfido Fortuna de baja ley y la Brecha Fortuna de alta ley se mezclan con zonas de vetas, todo bajo un fuerte control estructural, principalmente EW (Vega et al., 2015).

2.17.1. Alteración Potásica

Expresada con la ocurrencia de Bt dominante y localmente Kfeld, se asocian a facies de Tur y mineralización de Py > Cpy o a brechas de Bt con \pm Cpy > Py >> Moly (Figura 2.39.) (Vega et al., 2015).

2.17.2. Alteración Clorita - Sericita

Desarrollada y controlada por el Pórfido Fortuna y que se sobreimpone a la Alteración Potásica. Localmente, fluidos ricos en Chl se presentan en vetilleos o asociados a brechas de Chl, más Carb y/o Ep (Vega et al., 2015).

2.17.3. Alteración Fílica

Corresponde a la alteración predominante de intensidad moderada como halo y de desarrollo interno al Pórfido Fortuna. También se desarrolla intensamente asociada a los sistemas de vetas principales de Qz - Py y la unidad Brecha Fortuna que controla la mineralización hipógena principal (Vega et al., 2015).

2.17.4. Alteración Supérgena

Dentro de este dominio se reconocen eventos de intensa acidez acompañados de una Argilización Supérgena Avanzada, donde se reconocen asociaciones Arc - óxidos de Fe. En la Alteración Supérgena se desarrolla una amplia variedad de minerales como Kaol - Ill - Dic - Qz - Alun - Ser - Musc - Mont y una serie de sulfatos de Fe. Además, se desarrolla una zonación con un importante nivel de oxidados de Cu (Figura 2.40.) (Vega et al., 2015).

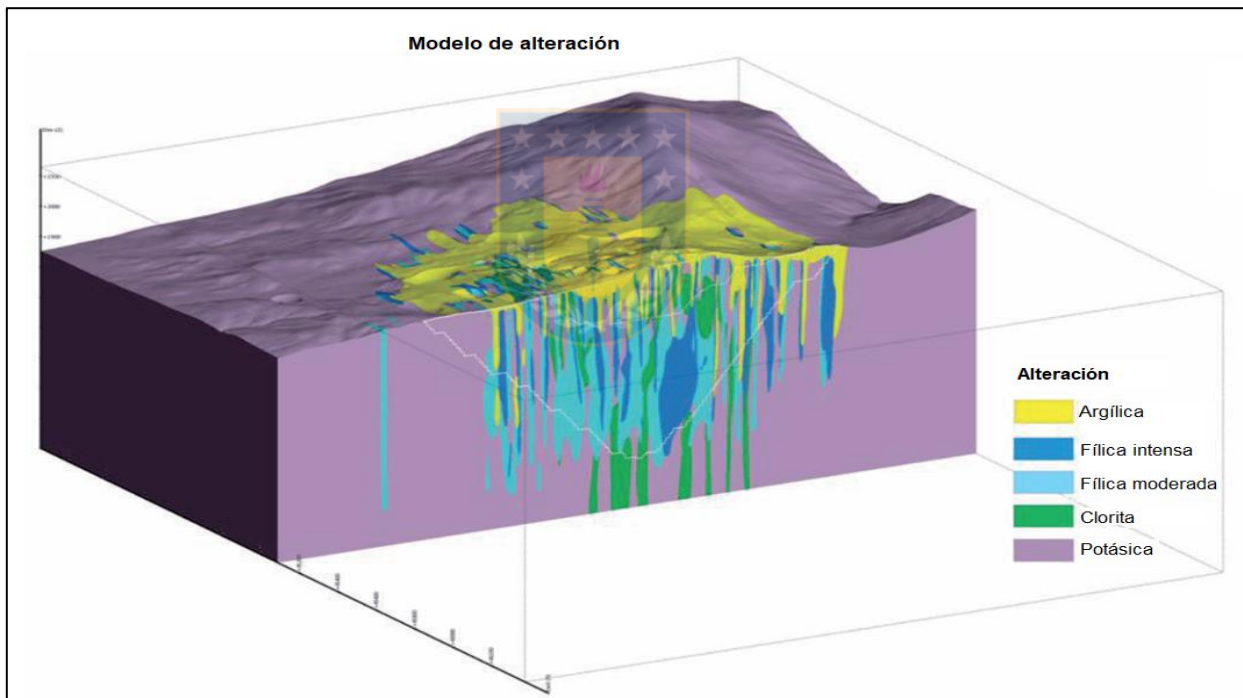


Figura 2.39. Vista isométrica del modelo de alteraciones yacimiento Fortuna de Cu, Lomas Bayas II. Modificado de Vega et al., 2015.

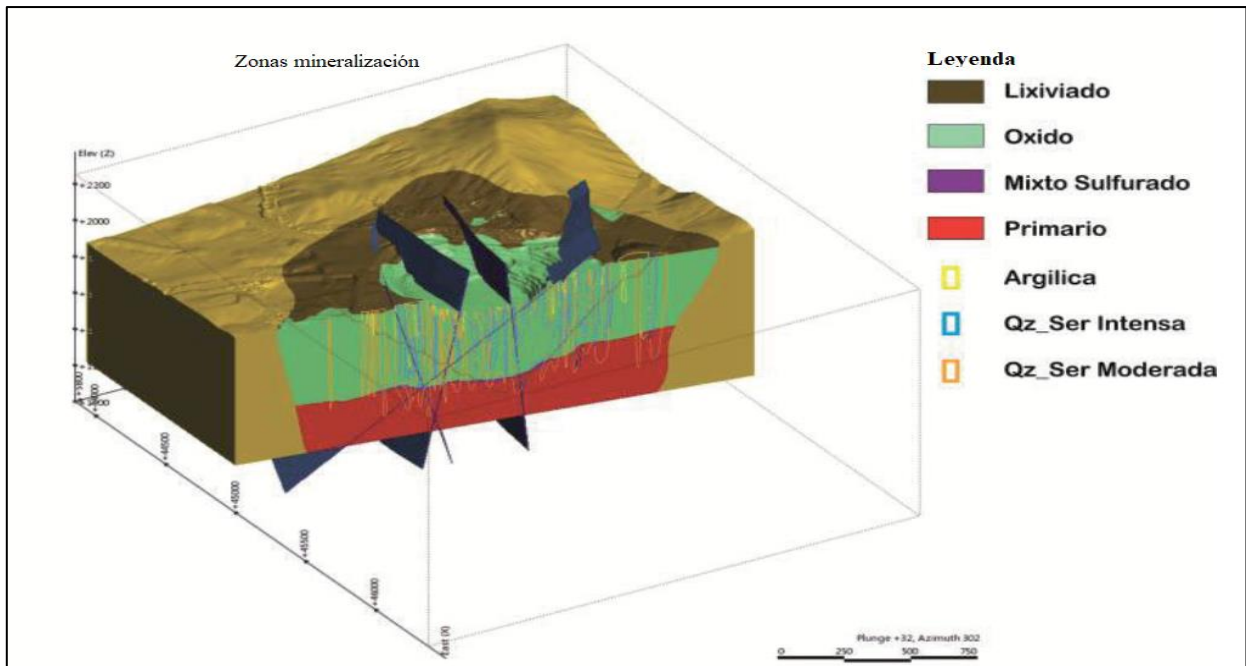


Figura 2.40. Vista isométrica del modelo de mineralización yacimiento Fortuna de Cu, Lomas Bayas II. Modificado de Vega et al., 2015.

2.18. Zaldívar - Escondida Norte

El yacimiento Zaldívar - Escondida Norte corresponde a un depósito tipo pórfido cuprífero que es explotado por dos compañías mineras distintas, compuesto por la ocurrencia del Pórfido Llamo favorecido por la Falla Portezuelo de rumbo NS (Figura 2.41.). Este cuerpo intruye a la Fm. La Tabla del Paleozoico en el segmento E y a la Fm. Augusta Victoria en el segmento W (Hervé et al., 2012).

2.18.1. Alteración Potásica

Relacionada a la zona basal del Pórfido Llamo con la ocurrencia de Bt - Mgt en andesitas y Kfeld - Qz en los cuerpos ígneos. Vetillas EB tempranas: Bt y/o Mgt - (Bn - Cpy), vetillas A sinuosas: Qz - Kfeld - Anh - Bn - Cpy - (Cc) y B transicionales: Qz - (Kfeld) - Cpy - Moly (Hervé et al., 2012).

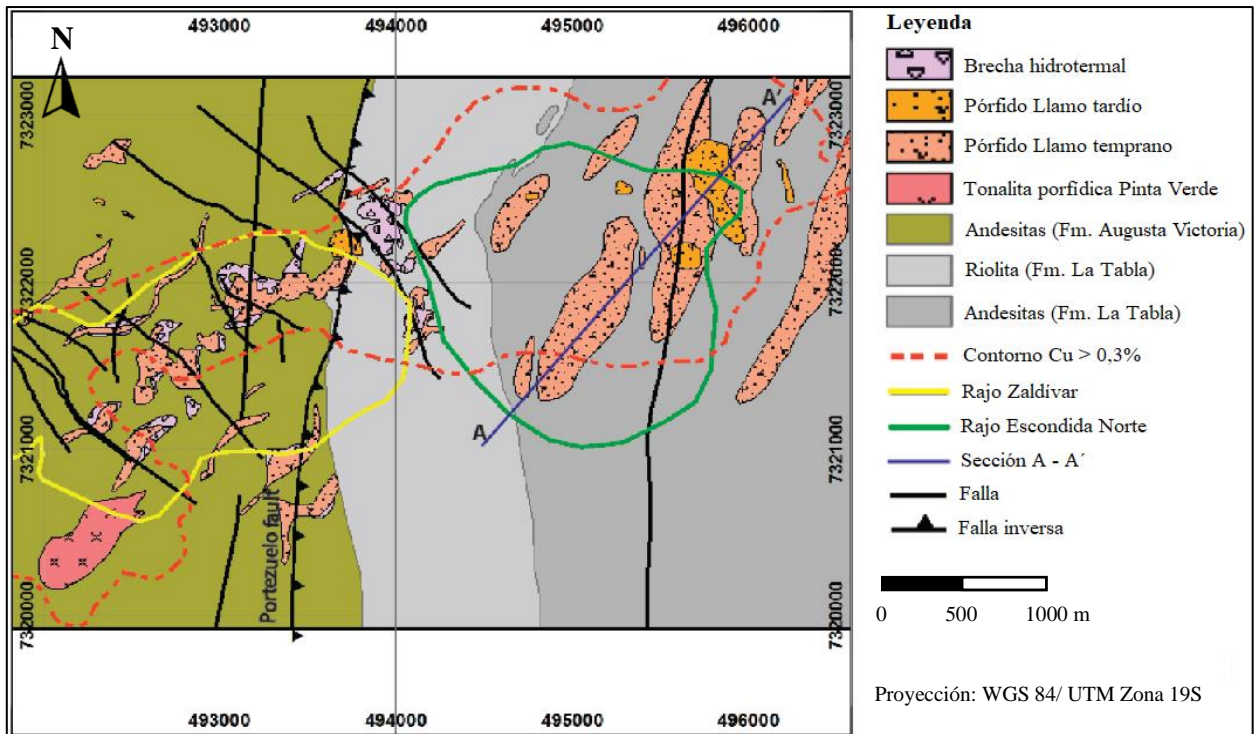


Figura 2.41. Geología del yacimiento Zaldívar - Escondida Norte. Modificado de Hervé et al., 2012; Evans & Lambert, 2012.

2.18.2. Alteración Fílica

Corresponde a la alteración más importante del depósito, dividida en un evento temprano de amplia ocurrencia de la asociación Ser - Chl con vetillas tipo C: Qz - Cpy - Moly - (Py - Cpy) y Ser - Chl como halo; y un evento principal pervasivo representado por la ocurrencia de Qz - Ser - Py con vetillas tipo D: Qz - Py - (Cpy - Esf) y Qz - Ser - Py como halo (Hervé et al., 2012).

2.18.3. Alteración Propilítica

Representada por la dominancia de Chl afectando a rocas andesíticas y al Pórfido Llamo tardío (Evans & Lambert, 2012).

2.18.4. Alteración Argílica

Alteración de carácter muy restringido, con la ocurrencia de vetillas tipo E: Qz - Pyr - (Alun) (Hervé et al., 2012).

2.18.5. Alteración Supérgena

Esta alteración lixivia y oxida las rocas, desarrollando una Alteración Argílica Supérgena afectando a todas las rocas con una intensidad variable, pero que típicamente afecta fuertemente a las rocas andesíticas (Evans & Lambert, 2012).

La zona lixiviada incluye hidróxidos y sulfatos de Fe (Hem - Goeth - Jar) con fosfatos de Cu (Turq); la zona oxidada Broc, Ant, óxidos negros de Cu y fosfatos de Cu; y la zona de enriquecimiento secundario es representada predominantemente por Cc y Cv en la zona transicional (Evans & Lambert, 2012).

La Figura 2.42. representa el modelo de alteración y la Figura 2.43. el modelo de mineralización del depósito Escondida Norte. Mientras que la Figura 2.44. el modelo de mineralización del yacimiento Zaldívar.

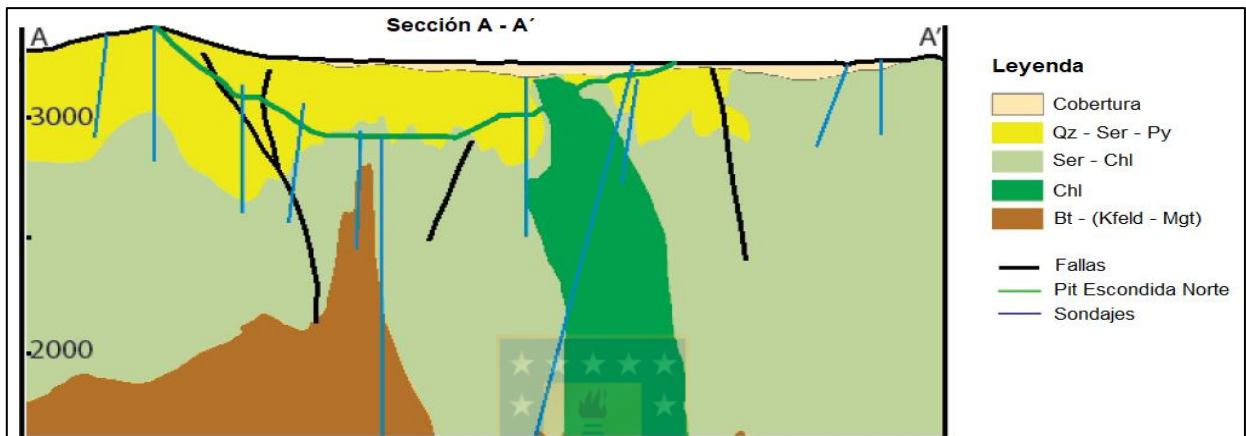


Figura 2.42. Modelo de alteraciones Sección A - A' Escondida Norte. Modificado de Hervé et al., 2012.

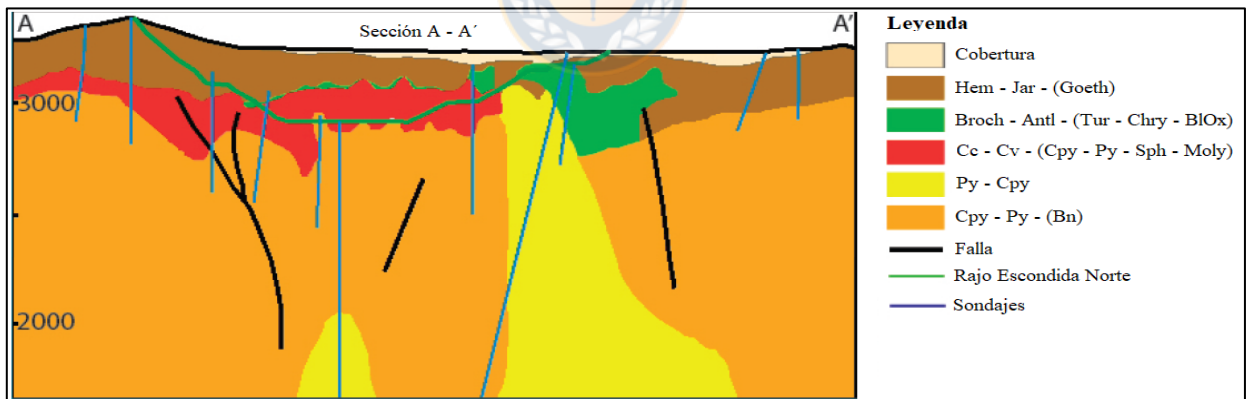


Figura 2.43. Modelo mineralización Sección A - A' Escondida Norte. Modificado de Hervé et al., 2012.

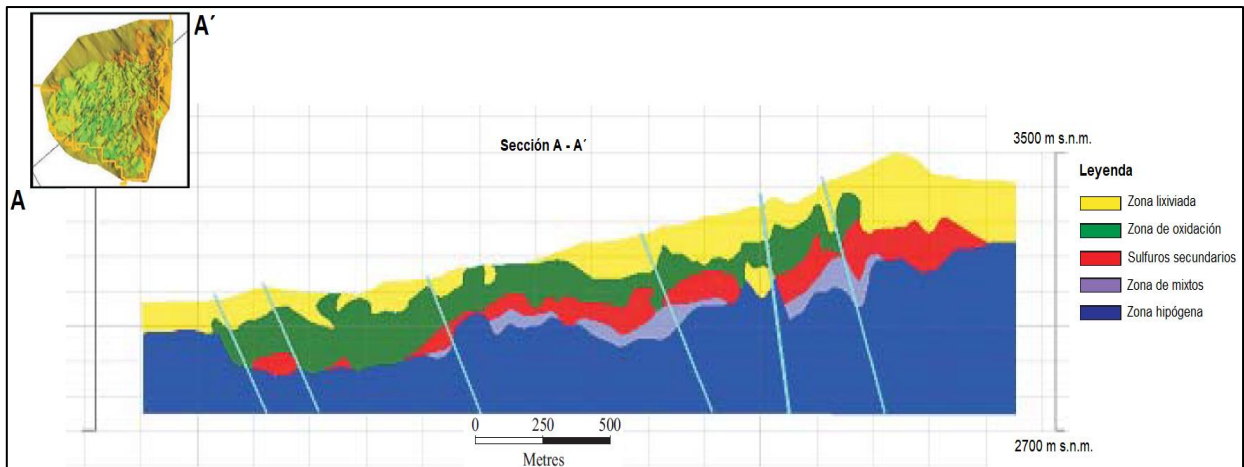


Figura 2.44. Modelo de mineralización Sección A - A' Zaldívar. Modificado de Evans & Lambert, 2012.

2.19. Escondida

Escondida corresponde a un depósito tipo pórfido cuprífero compuesto por tres cuerpos porfídicos (*Stock* Escondida): pórfido diorítico, cuarzomonzonítico y granodiorítico, los cuales intruyen a andesitas pertenecientes a la Fm. Augusta Victoria del Paleoceno (Figura 2.45.). Además, se reconoce un cuerpo de brechas hidrotermales y un pórfido post - mineralización de composición riolítica. Este yacimiento está inmerso en el dominio del Sistema de Fallas de Domeyko (Garza et al., 2001).

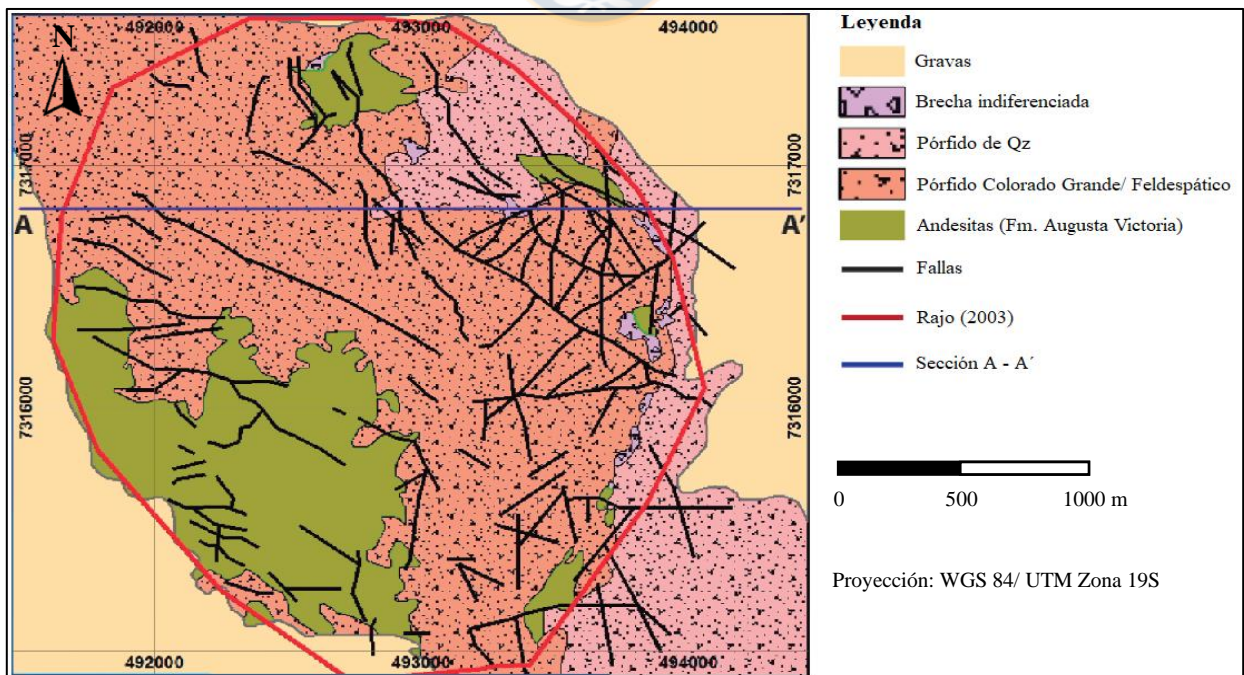


Figura 2.45. Geología del yacimiento Escondida. Modificado de Garza et al., 2001.

2.19.1. Etapa 1 de Alteración Hidrotermal

2.19.1.1. Alteración Potásica

Se manifiesta por la ocurrencia de Bt con cantidades menores de Kfeld en andesitas y la asociación Mgt - Bn - Cpy de forma pervasiva principalmente en vetillas. En el *stock* Escondida se caracteriza por Kfeld - Qz \pm Bt - Anh con Bn - Cpy (Figura 2.46.) (Garza et al., 2001).

2.19.1.2. Silicificación

Se observa como una capa pervasiva de Qz de grano fino en el contacto del cuerpo intrusivo con la roca caja (andesitas). Este fenómeno es interpretado como metasomatismo de contacto producto de la intrusión del *Stock* Escondida (Garza et al., 2001).

2.19.1.3. Alteración Propilítica

Caracterizada por la ocurrencia de vetillas de Ep - Chl - Zeo \pm Py y raramente Cpy, Gr y Alb. Esta alteración comienza en la etapa 1 y probablemente continúa evolucionando durante las siguientes etapas (Garza et al., 2001).

2.19.2. Etapa 2 de Alteración Hidrotermal

2.19.2.1. Chl - Ser \pm Qz

Alteración presente en vetillas de poco espesor con Cpy \pm Py - Moly \pm Qz y halo de Chl - Ser, dominando la Chl hacia el borde externo. Afecta a las andesitas y al *Stock* Escondida (Garza et al., 2001).

2.19.2.2. Qz - Ser (Verde a Gris)

Alteración en vetillas de Qz - Cpy \pm Py - Moly con un amplio halo de Qz - Ser (verde a gris) que afecta principalmente al *Stock* Escondida y pervasivamente en zonas de falla (Garza et al., 2001).

2.19.2.3. Py - Ser

Alteración en vetillas de Py \pm Cpy y un amplio halo de Ser blanca y Py diseminada (Garza et al., 2001).

2.19.3. Etapa 3 de Alteración Hidrotermal

2.19.3.1. Alteración Argílica Avanzada

Asociación de Pyr - Ser - Qz - Alun en vetillas con abundantes sulfuros que incluye Bn - Cpy - Py - Cv lamelar \pm Cc \pm Ena \pm Esf con exsolución de Ten - Cpy - Gal. Se distribuye

pervasivamente en el contacto con el pórfido riolítico y la roca caja, pero su dirección principal de ocurrencia es N 40° W en las zonas de falla (Garza et al., 2001).

2.19.4. Alteración Supérgena

Esta alteración se caracteriza por un importante desarrollo de sulfuros secundarios Cc - Cv, en menor medida oxidados de Cu, tales como Broc - Ant - Atac - Chry - *Copper wad* - Teno y una zona lixiviada (Figura 2.47.) (Garza et al., 2001).

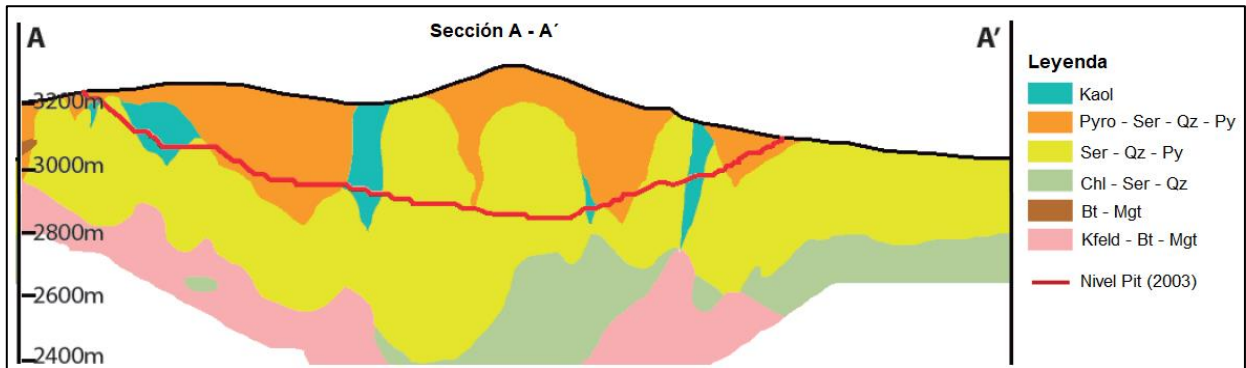


Figura 2.46. Modelo de alteraciones Sección A - A' Escondida. Modificado de Garza et al., 2001.

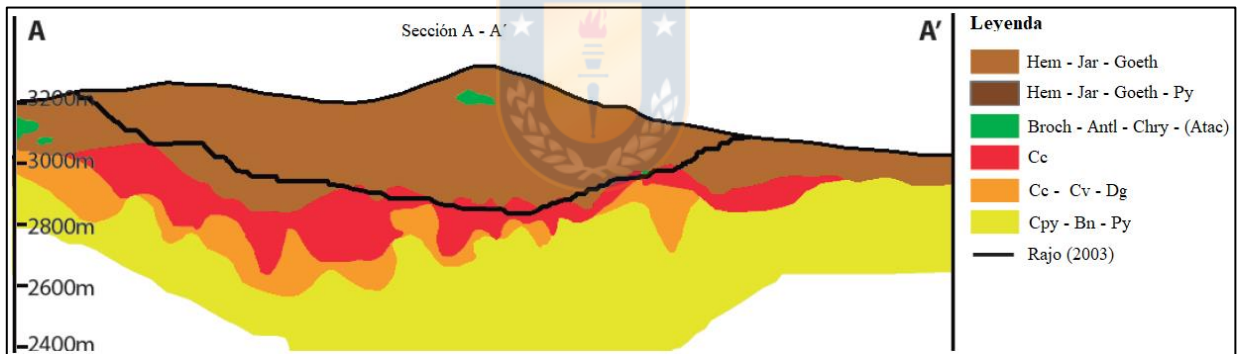


Figura 2.47. Modelo de mineralización Sección A - A' Escondida. Modificado de Garza et al., 2001.

2.20. El Salvador (Distrito Indio Muerto)

El Salvador corresponde a un depósito tipo pórfido cuprífero que consiste en una serie de cuerpos porfídicos emplazados a lo largo de un cinturón con tendencia NNE (Figura 2.48.). Estos cuerpos intruyen a rocas volcánicas de la Fm. Llanta del Cretácico tardío, secuencias riolíticas de la Fm. Hornitos del Paleógeno y a domos riolíticos del Eoceno (Gustafson et al., 2001).

El distrito se caracteriza por la presencia de varios centros mineralizados, tales como: Cerro Pelado, Campamento Antiguo, Quebrada M, "O Nose", Quebrada Turquesa, Sector Granito y Quebrada Granito (Gustafson et al., 2001).

Actualmente, el proyecto Rajo Inca permitirá la continuidad operacional en el distrito.

2.20.1. Alteración Hidrotermal Temprana

Caracterizada por la ocurrencia de un núcleo de Alteración Potásica con la asociación Kfeld - Bt - Qz - Cpy - Bn, que luego grada a Ser - Chl - Cpy - Py y Chl - Ep - Alb. En Cerro Pelado destaca la fuerte mineralización de Moly (Gustafson et al., 2001).

2.20.2. Alteración Hidrotermal Tardía

Este evento se caracteriza por sobreimponerse al evento temprano con la asociación Ser - Py - Cpy y vetillas tipo D: Py - Bn - Dig (Gustafson et al., 2001).

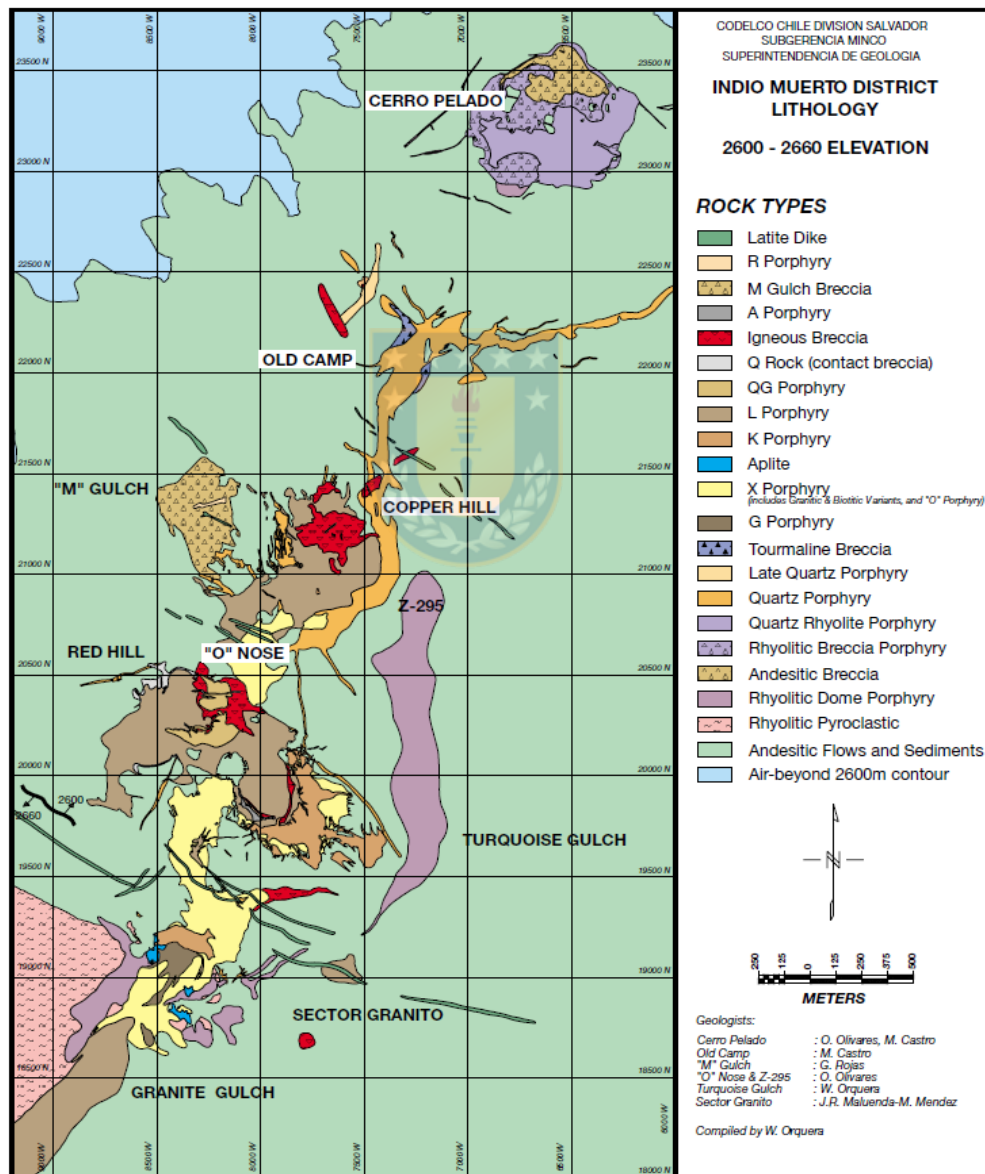


Figura 2.48. Geología del Distrito Indio Muerto. Extraído de Gustafson et al., 2001.

2.20.3. Alteración Supérgena

Alteración de amplio desarrollo en el distrito con la ocurrencia de Cc - Cv y desarrollo de Kaol supérgena (Figura 2.49.) (Gustafson et al., 2001).

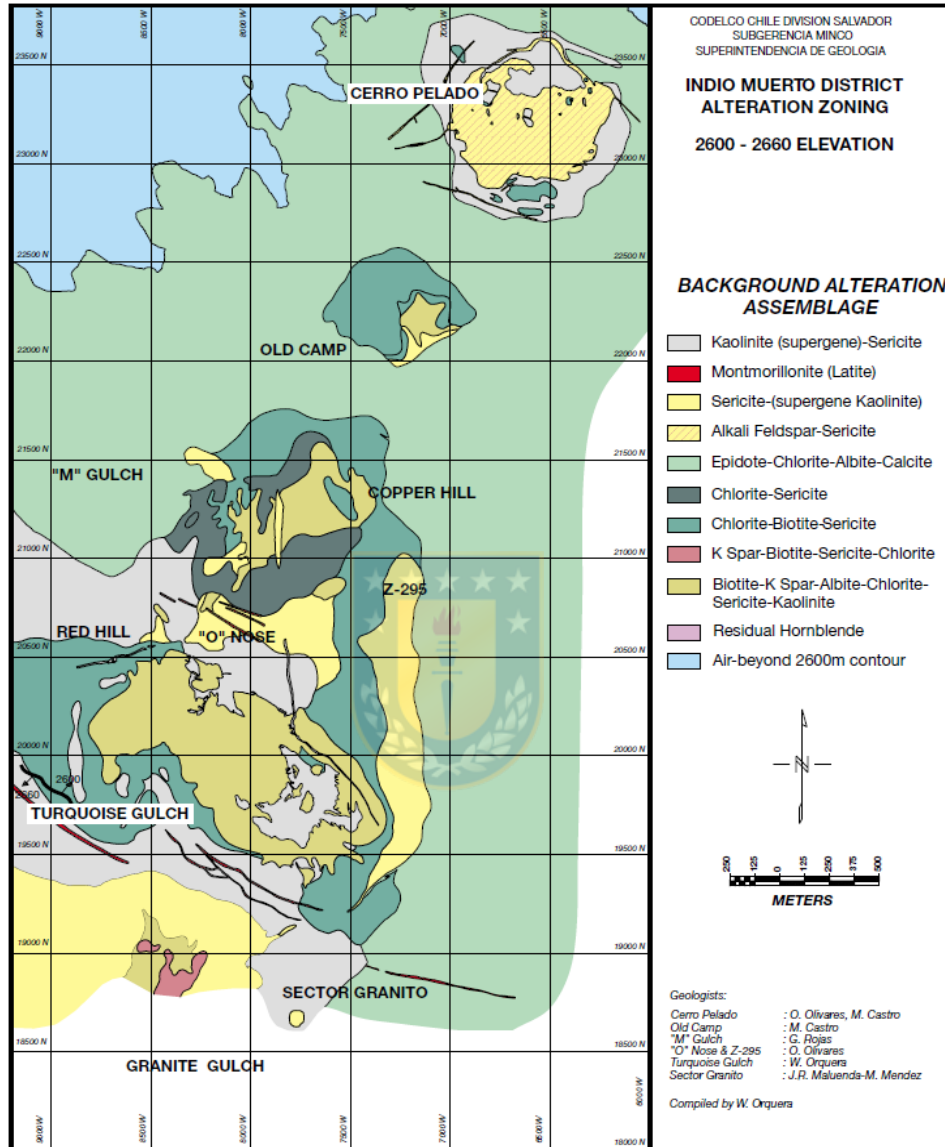


Figura 2.49. Mapa de alteraciones Distrito Indio Muerto. Extraído de Gustafson et al., 2001

2.21. Candelaria

Candelaria corresponde a un depósito IOCG cuya disposición y mineralización es controlada por el Sistema de Falla de Atacama (Figura 2.50.). El yacimiento está hospedado en secuencias volcánicas y volcanoclásticas del Grupo Bandurrias y Chañarillo del Cretácico temprano adyacente a los granitoides del Batolito Copiapó (Marschik & Fontboté, 2001).

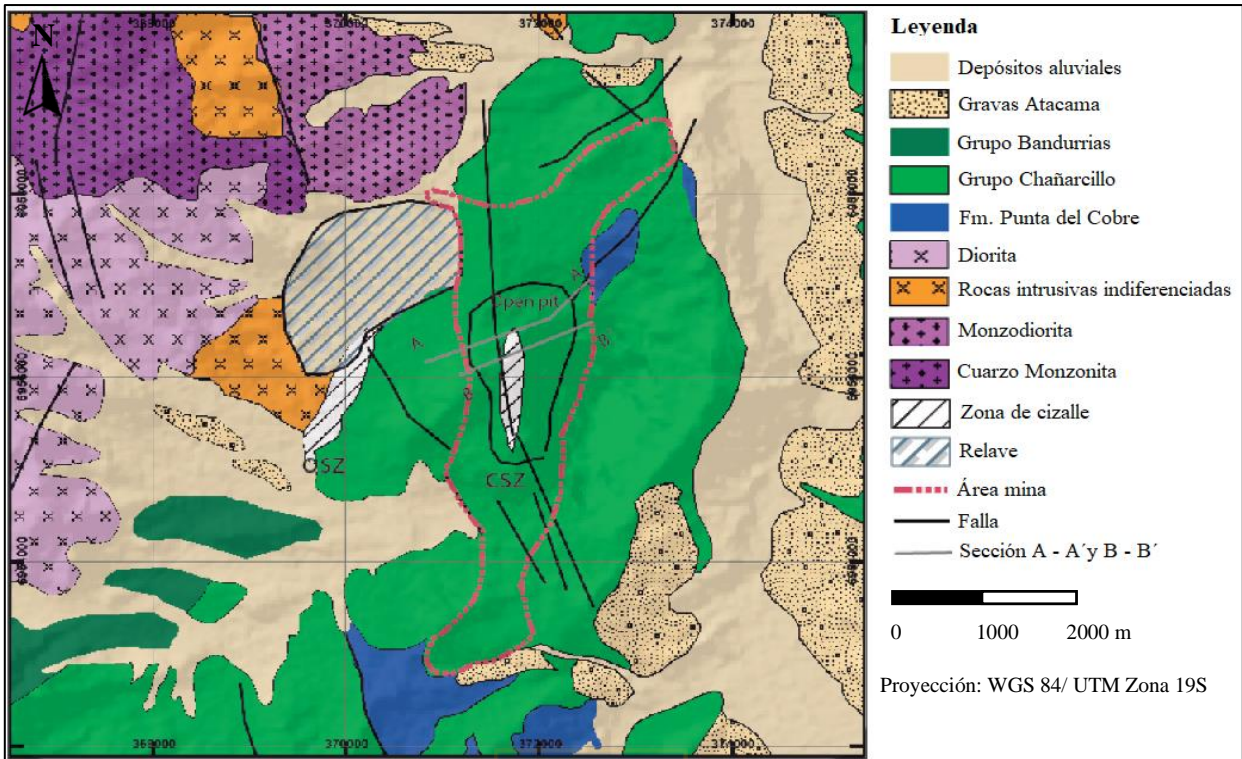


Figura 2.50. Geología del yacimiento Candelaria. Modificado de Marschik & Fontboté, 2001.

2.21.1. Alteración Sódica

Caracterizada por la ocurrencia de Alb o Na - Plg (Chl - Qz) afectando de forma pervasiva a rocas volcánicas, volcanoclásticas e intrusivas (Phelps Dodge Corp., 2004).

2.21.2. Alteración Potásica (Etapa de Óxidos de Fe)

Representada por Bt - Kfeld - Qz - Mgt - Hem (Figura 2.51.) pervasivamente y en menor medida vetillas afectando rocas volcanoclásticas y volcánicas (Phelps Dodge Corp., 2004).

2.21.3. Alteración Cálctica (Etapa de Sulfuros)

Alteración pervasiva y en vetillas con la ocurrencia de Hbl - Cpy - Au - Py (Anh) afectando rocas volcánicas y volcanoclásticas (Phelps Dodge Corp., 2004).

2.21.4. Alteración Potásica - Cálctica

Alteración pervasiva y en vetillas con la ocurrencia de Hbl - Bt \pm Qz - Kfeld - Ep y Cpy - Hem - Py en rocas volcanoclásticas y volcánicas (Phelps Dodge Corp., 2004).

2.21.5. Alteración Sódico - Cálctica

Alteración pervasiva y en menor medida en vetillas representada por Na Scp \pm Px - Hbl - Ep y Cpy \pm Py (Phelps Dodge Corp., 2004).

La Figura 2.52. representa el modelo de mineralización en el depósito Candelaria.

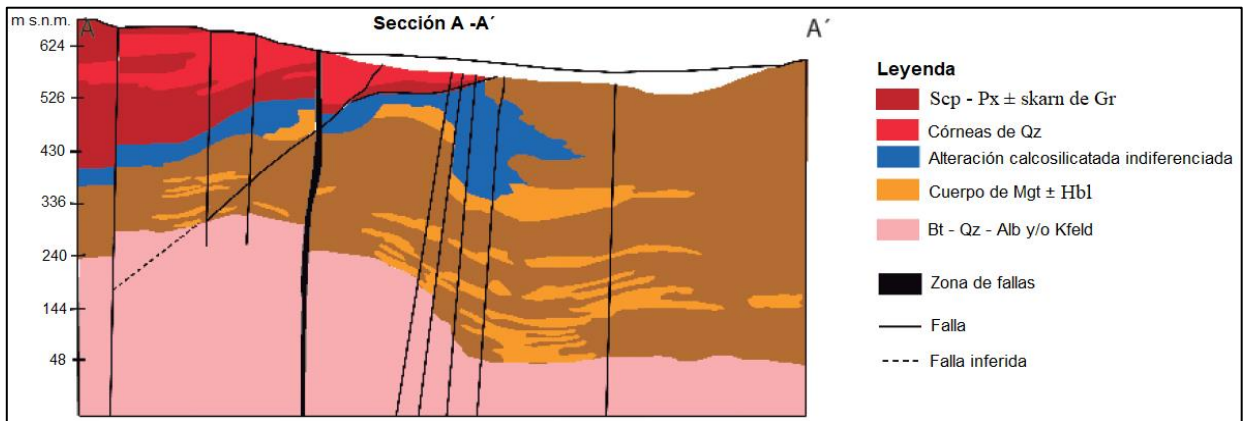


Figura 2.51. Modelo de alteraciones Sección A -A' Candelaria. Modificado de Phelps Dodge Corp., 2004.

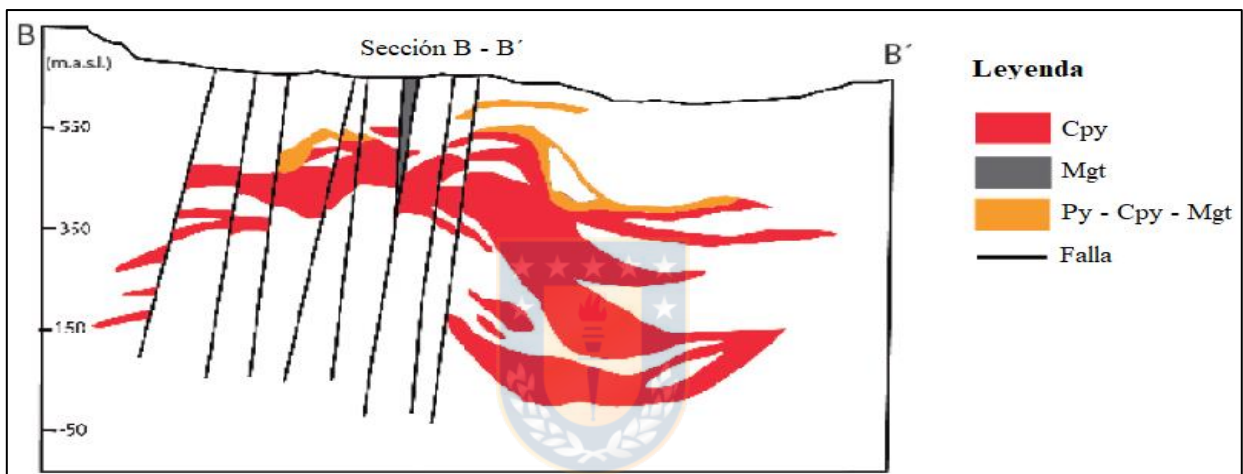


Figura 2.52. Modelo de mineralización Sección B - B' Candelaria. Modificado de Phelps Dodge Corp., 2004.

2.22. Caserones

Caserones corresponde a un depósito tipo pórfido cuprífero que consiste en un cuerpo porfídico de composición dacítica y brechas magmáticas e hidrotermales (Figura 2.53.). Estos cuerpos intruyen al Granito Caserones del Paleozoico (Eggleston et al., 2005) y a la Fm. La Ternera, Lagunillas y Quebrada Seca del mesozoico (ARCADIS Geotécnica, 2008).

Las principales estructuras que controlan la mineralización y distribución en el depósito se disponen con tendencias NS y SW - NE (Lumina Copper, 2015).

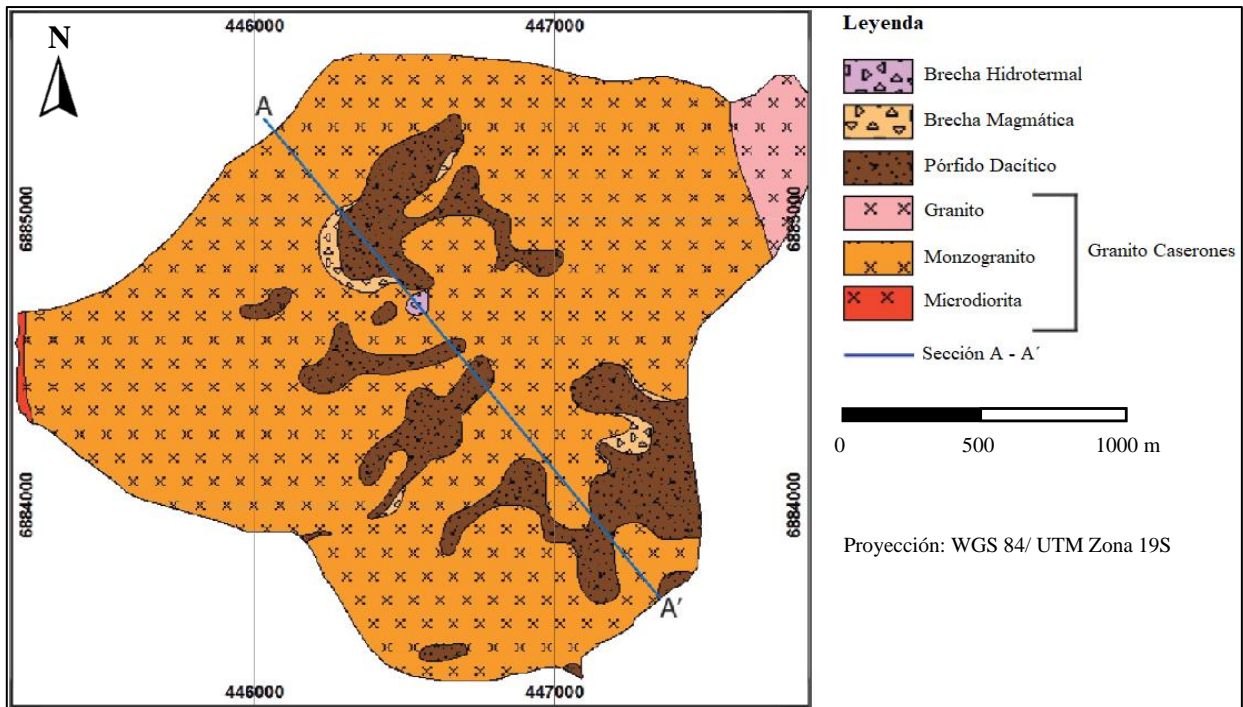


Figura 2.53. Geología del yacimiento Caserones. Modificado de Eggleston et al., 2005.

2.22.1. Alteración Potásica

Caracterizada por Bt secundaria - Kfeld - Qz - Py en vetillas tipo A afectando las zonas más profundas del depósito (Figura 2.54.) (Eggleston et al., 2005).

2.22.2. Alteración Propilítica

Representa la alteración externa del sistema por la asociación Chl - Ep - Mgt - Cal - Py (ARCADIS Geotécnica, 2008).

2.22.3. Alteración Fílica

Reconocible a partir de la ocurrencia de Qz - Ser - Py - Cpy - Bn - Moly en vetillas (Eggleston et al., 2005). Esta alteración posee un marcado control estructural y litológico, observándose pervasivamente en los cuerpos de brechas (ARCADIS Geotécnica, 2008).

2.22.4. Alteración Argílica

Observable como pequeños parches alrededor de las alteraciones Potásica y Fílica (Figura 2.50.).

2.22.5. Alteración Supérgena

Los procesos supérgenos en Caserones son de gran importancia, dando lugar a una zona lixiviada (Hem - Jar - Goeth), de oxidados de Cu (Chal - Chry - Broc ± Mal ± Azur ± Ant) y de

enriquecimiento secundario (Cc - Cv) (Figura 2.55.). Estos procesos también propician la ocurrencia de Kaol y Alun (Eggleston et al., 2005).

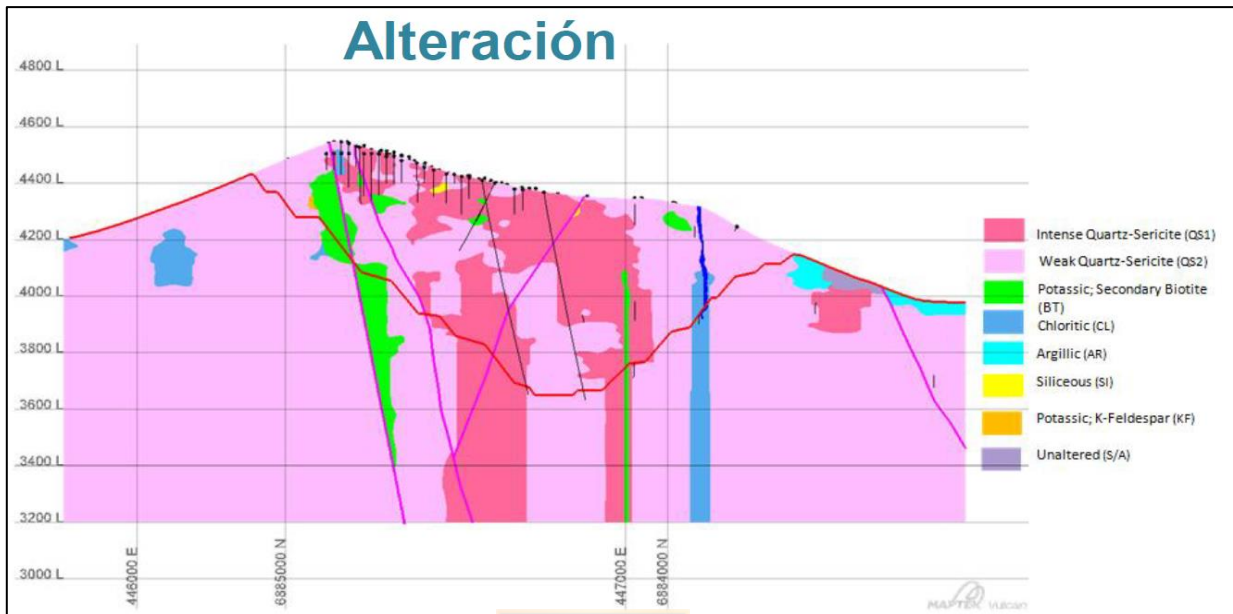


Figura 2.54. Modelo de alteraciones yacimiento Caserones. Extraído de Lumina Copper, 2015.

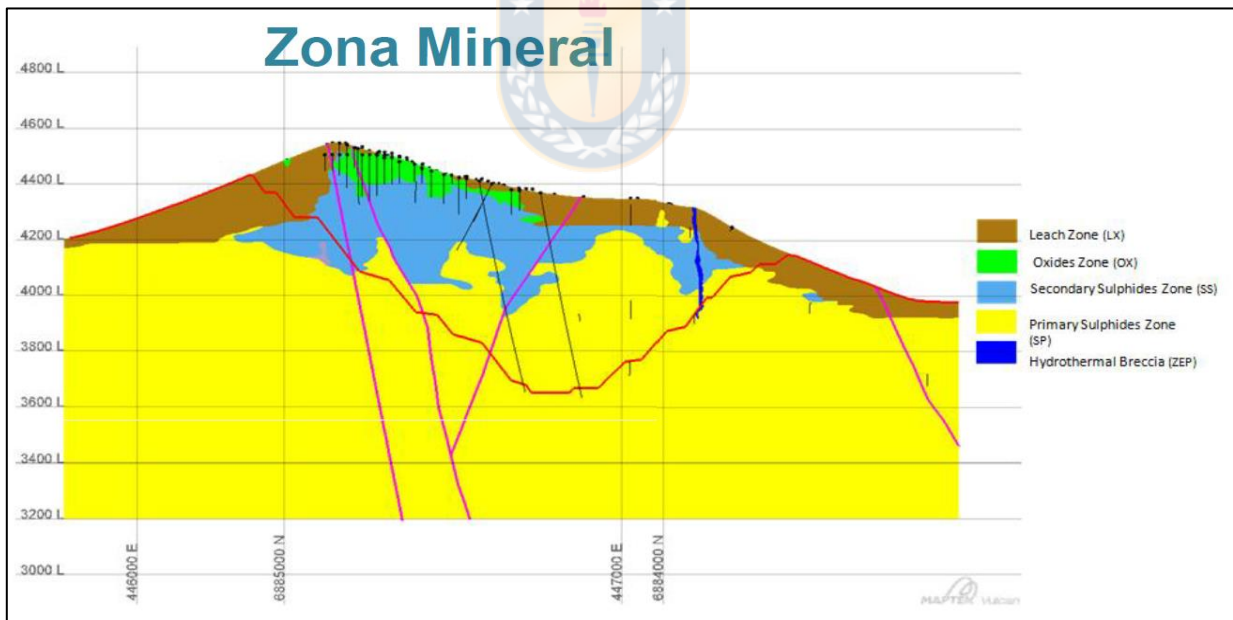


Figura 2.55. Modelo de mineralización yacimiento Caserones. Extraído de Lumina Copper, 2015.

2.23. Carmen de Andacollo

Carmen de Andacollo corresponde a un depósito tipo pórfido cuprífero que evoluciona a un epitermal de Au. El yacimiento se compone del Pórfido Andacollo de composición tonalítica a monzonítica que intruyen a secuencias volcanosedimentarias de la Fm. Quebrada Marquesa del

Cretácico temprano (Figura 2.56.). Las estructuras principales en el área se disponen con tendencias NS y NW (Griffith, 2006).

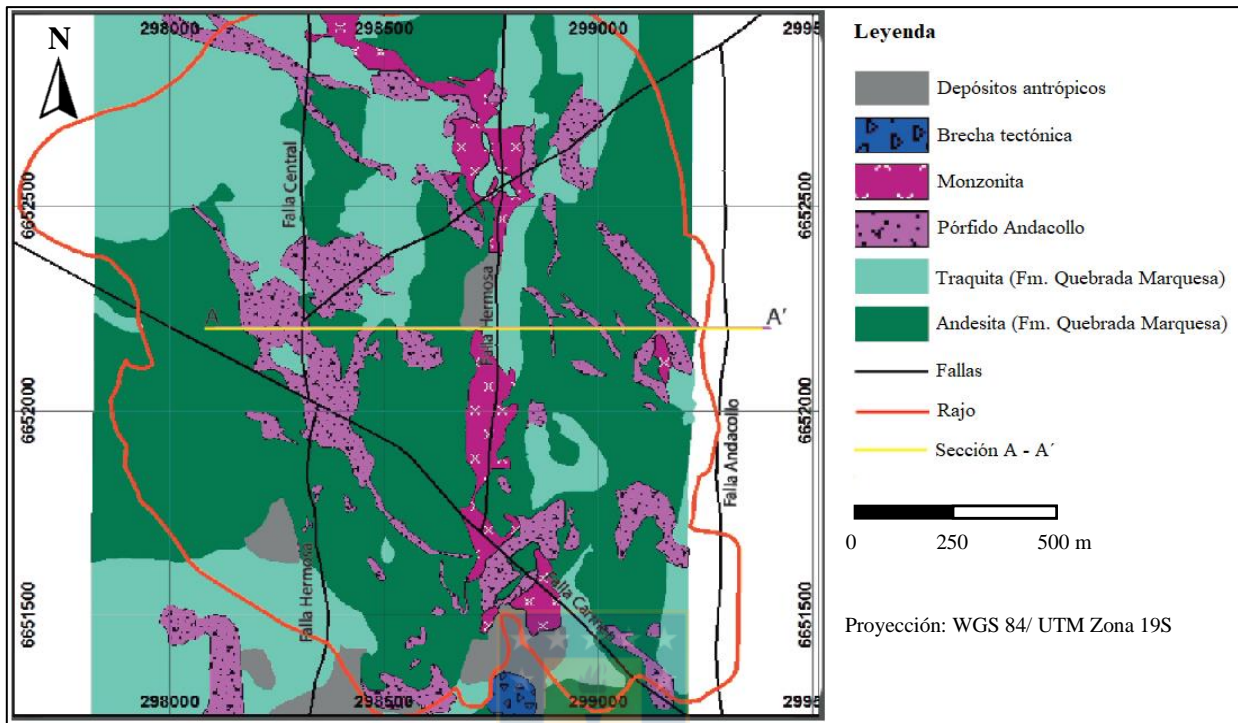


Figura 2.56. Geología del yacimiento Carmen de Andacollo. Modificado de Griffith, 2006.

2.23.1. Alteración Potásica

Expresado en la ocurrencia de la asociación Alb - Qz - Kfeld - Bt, la Bt está mayormente relacionada a las rocas andesíticas y el Kfeld al Pórfido Andacollo. Vetillas tipo A: Qz - Kfeld - Bt - (Py) y B: Qz - Kfeld - Cpy - Py - (Bt - Moly) (Llaumett et al., 1975).

2.23.2. Alteración Propilítica

Caracterizada por la asociación Chl - Ep - Py y relacionada a la ocurrencia de los sistemas epitermales de Au - Cu (Llaumett et al., 1975).

2.23.3. Alteración Fílica

Representada por Qz - Ser - Py de forma pervasiva sobreimpuesta a la Alteración Potásica. Vetillas tipo D: Qz - Py - Cpy - Ser - (Chl) y halo de Py - Ser (Llaumett et al., 1975).

2.23.4. Alteración Argílica Supérgena

Alteración reconocible por la ocurrencia de Arc y Ser sobreimponiéndose a la Alteración Fílica y mayormente entre la capa lixiviada y la de enriquecimiento secundario (Llaumett et al., 1975).

2.23.5. Alteración Supérgena

La zona de lixiviación se caracteriza principalmente por Lim y zonas restringidas de oxidados de Cu. La zona de enriquecimiento secundario es reconocible por la asociación Py - Cc - Cpy de disposición muy regular y cercanamente horizontal con un espesor promedio de 40 m (Figura 2.57.) (Llaumett et al., 1975).

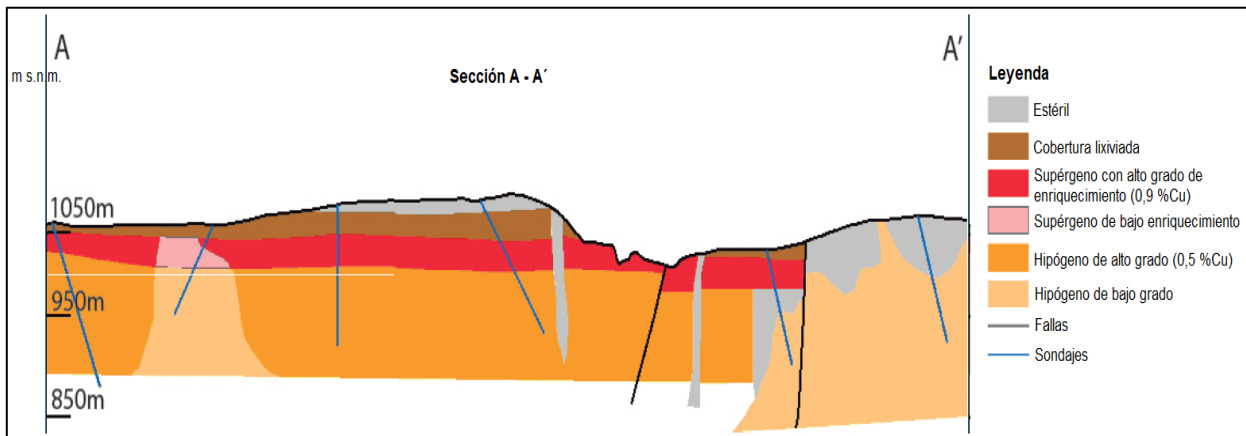


Figura 2.57. Modelo de mineralización Sección A - A' Carmen de Andacollo. Modificado de Llaumett et al., 1975.

2.24. Los Pelambres

Los Pelambres corresponde a un depósito tipo pórfido cuprífero que consiste en una serie de pórfidos asociados a brechas magmáticas e hidrotermales (Figura 2.58.) emplazados en lavas andesíticas de la Fm. El Pachón del Mioceno (Perelló et al., 2012 en Saavedra, 2019). El yacimiento se encuentra adyacente al sistema de fallas homónimo de componente inverso y rumbo NS (Saavedra, 2019).

2.24.1. Alteración Potásica

Esta alteración se restringe al *stock* diorítico y corresponde a la de mayor extensión e importancia económica dado que aloja casi toda la mineralización de Cu - Mo. Está definida por la presencia de Kfeld y Bt, localmente incluye parches de una masa aplítica formada por Qz - Kfeld - Bt - Anh y sulfuros. La mineralización asociada a esta zona consiste en Cpy - Bn, con Py en vetillas, Moly y Esf (Saavedra, 2019).

2.24.2. Alteración Fílica

Compuesta por Qz - Ser con Chl - Tur - Ep - Yes subordinados. Se encuentra en el sector NW de la mina y la mineralización asociada a esta alteración corresponde a Py (en vetillas y disseminada) junto con Cpy - Moly - Mgt (Saavedra, 2019).

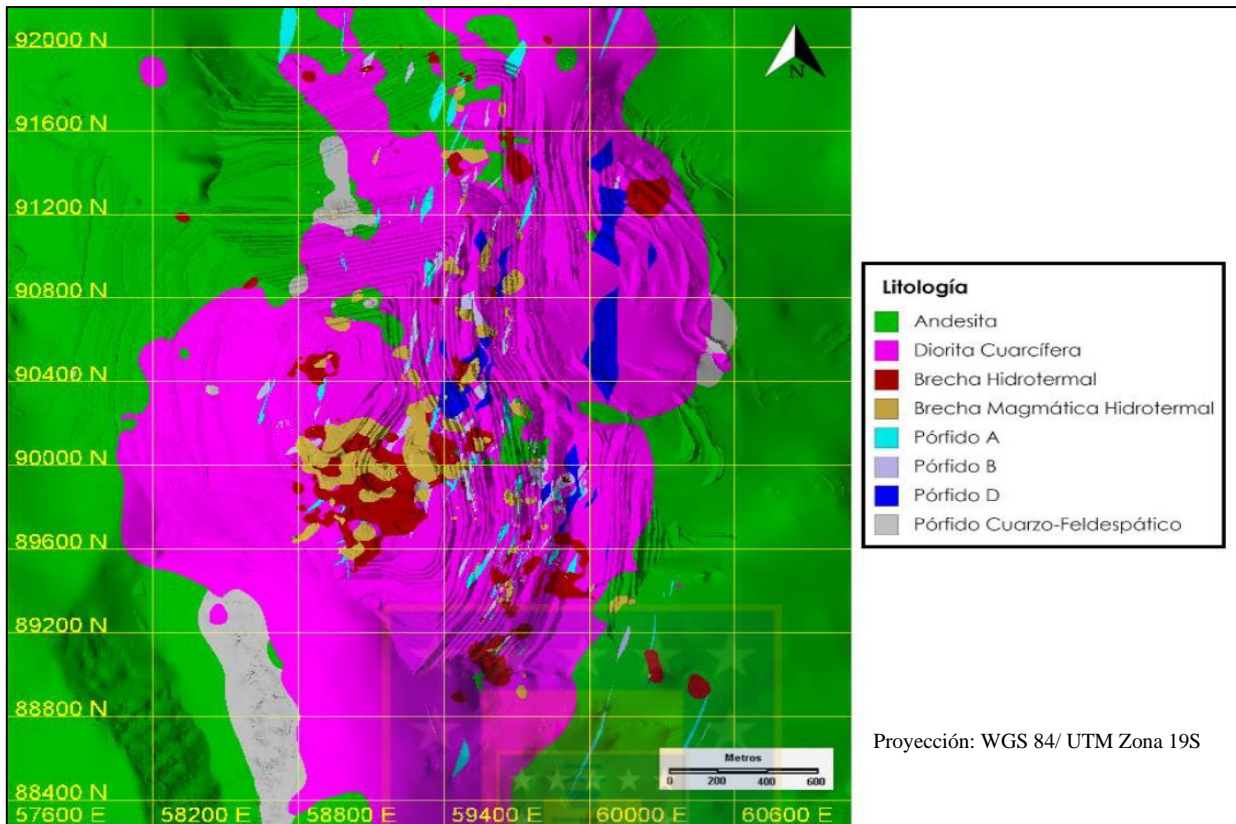


Figura 2.58. Modelo litológico de Los Pelambres. Extraído de Saavedra, 2019.

2.24.3. Alteración Propilítica

Se ubica en la zona externa del rajo, afectando a las rocas volcánicas (Figura 2.59.). Los minerales presentes corresponden a Chl - Ep y Py subordinada, con trazas de Cal en amígdalas y vetillas (Saavedra, 2019).

2.24.4. Alteración Supérgena

Esta alteración favoreció la formación de un nivel de sulfuros secundarios, donde la Cc - Cv se disponen formando una franja de orientación NS que coincide con la ubicación de la Quebrada Pelambres (Saavedra, 2019).

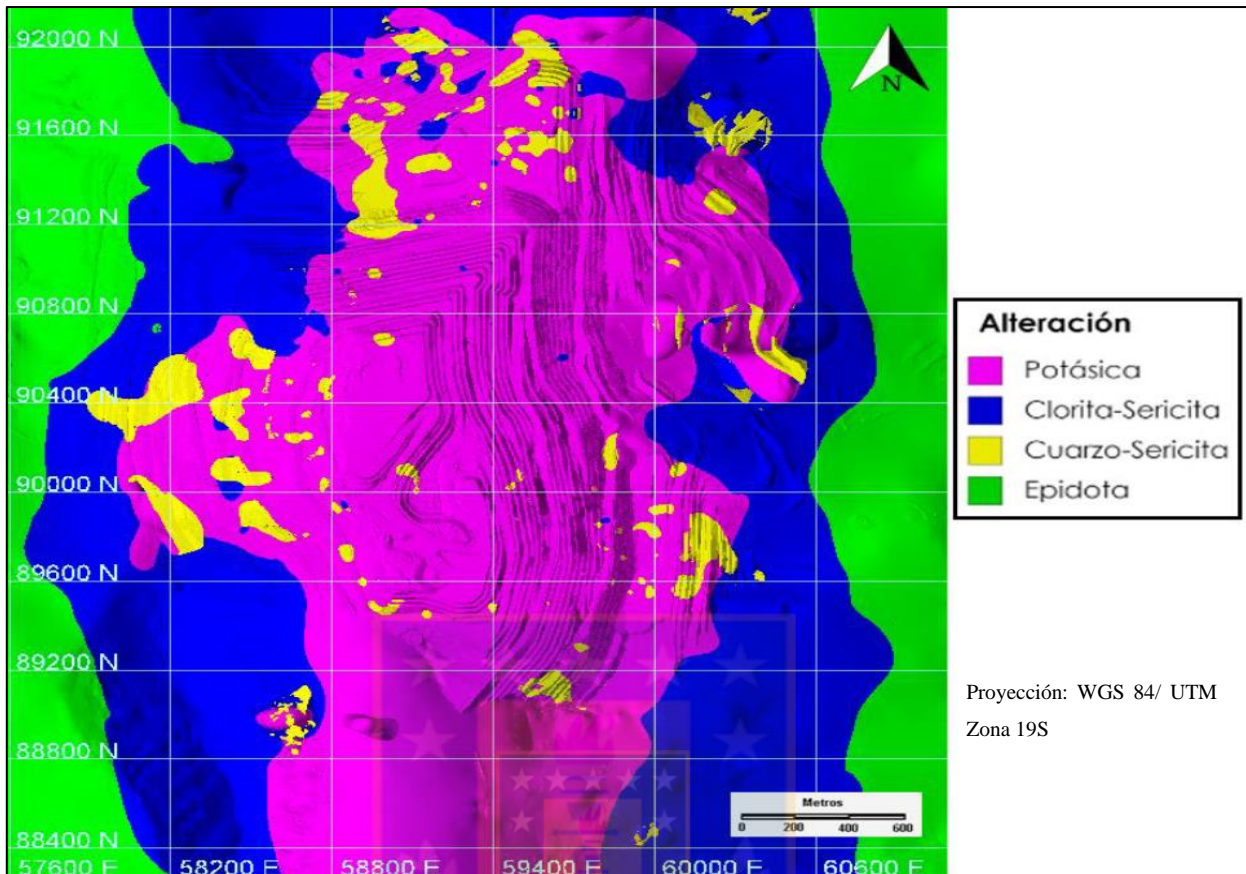


Figura 2.59. Modelo de alteración de Los Pelambres. Extraído de Saavedra, 2019.

2.25. El Soldado

El Soldado corresponde a un depósito tipo estratoligado hospedado en el miembro superior de la Fm. Lo Prado del Cretácico Inferior. El miembro superior de esta unidad está compuesto por unidades félsicas y máficas sobreyaciendo al miembro inferior sedimentario. La Fm. Lo Prado sobryace a la Fm. Horqueta del Jurásico Superior e infrayace a la Fm. Veta Negra del Cretácico (Wilson & Zentilli, 1999).

La mineralización en el yacimiento depende fuertemente del control estructural, con tendencias NS - NNW, especialmente en las intersecciones de fallas con tendencia EW, NS y NNW dando lugar a varios bolsones o bonanzas (Figura 2.60.). Otro factor corresponde al litológico, ocurriendo la mineralización principalmente en riodacitas por sobre basaltos (Wilson & Zentilli, 1999).

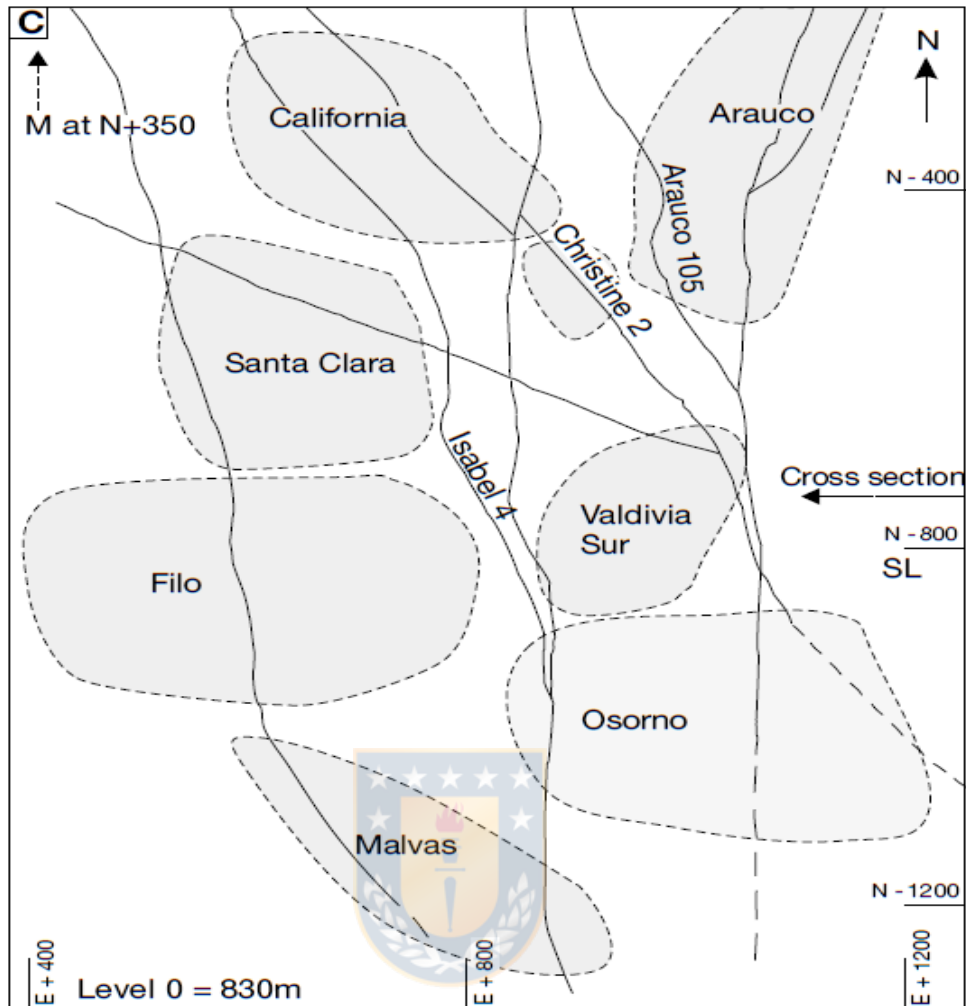


Figura 2.60. Mapa esquemático de distribución de cuerpos mineralizados yacimiento El Soldado. Extraído de Wilson et al., 2003.

2.25.1. Alteración Hidrotermal

Expresada en la ocurrencia de abundante Cal - Chl - Alb - Kfeld - Ep - Sil - Tit - Rut \pm Ser - Ill - Mont. La mineralización metálica corresponde a Cpy - Bn - Cc - Py - Hem \pm Esf - Gal - Apy. (Wilson & Zentilli, 1999; Wilson et al., 2003).

Los centros mineralizados o bonanzas se componen de un núcleo ricos de Bn - Cc y Bn - Cpy que gradan en los bordes a Cpy - Py (Figura 2.61.) (Wilson et al., 2003).

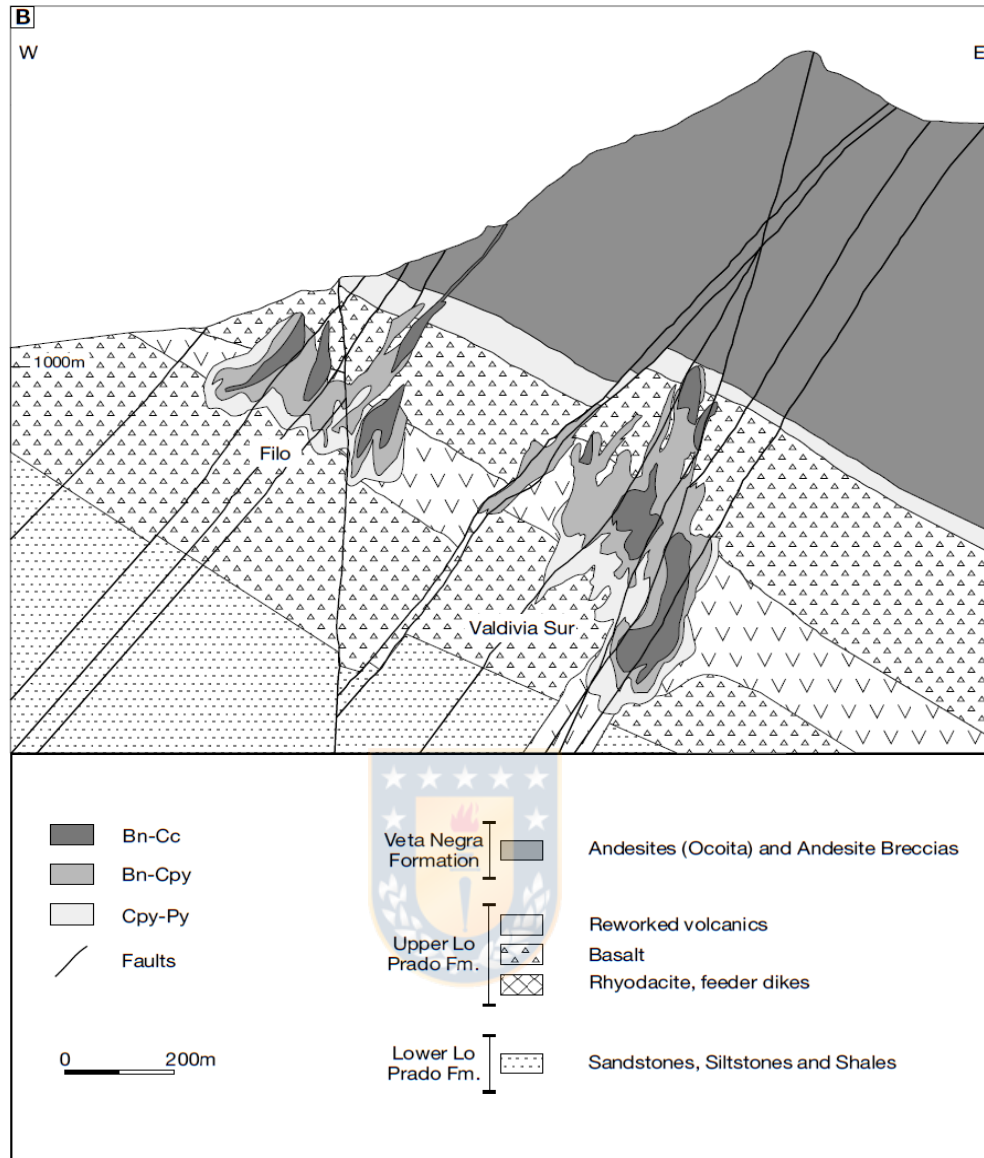


Figura 2.61. Modelo de mineralización El Soldado. Extraído de Wilson et al., 2003.

2.26. Río Blanco - Los Bronces

El yacimiento Río Blanco - Los Bronces corresponde a un depósito tipo pórfido cuprífero compuesto por un complejo de brechas mineralizadas de edad Mioceno superior a Plioceno inferior y pórfidos tardíos de edad Plioceno inferior, que intruyen a rocas cuarzomonzónicas a monzoníticas pertenecientes al Batolito San Francisco, de edad Mioceno inferior a medio (Figura 2.62.). Estas unidades a su vez intruyen a rocas andesíticas de la Fm. Abanico y Fm. Farellones de edad Oligoceno a Mioceno medio (Serrano et al., 1996 en Abarzúa, 2014).

La propiedad de este mega depósito está compartida entre la filial Sur Andes de Anglo American y División Andina de CODELCO Chile. En el sector de Sur Andes se explotan dos

cuerpos mineralizados principales denominados Donoso e Infiernillo y en el sector de Andina, tres cuerpos mineralizados denominados Río Blanco, Don Luis y Sur Sur (Spiess, 2017).

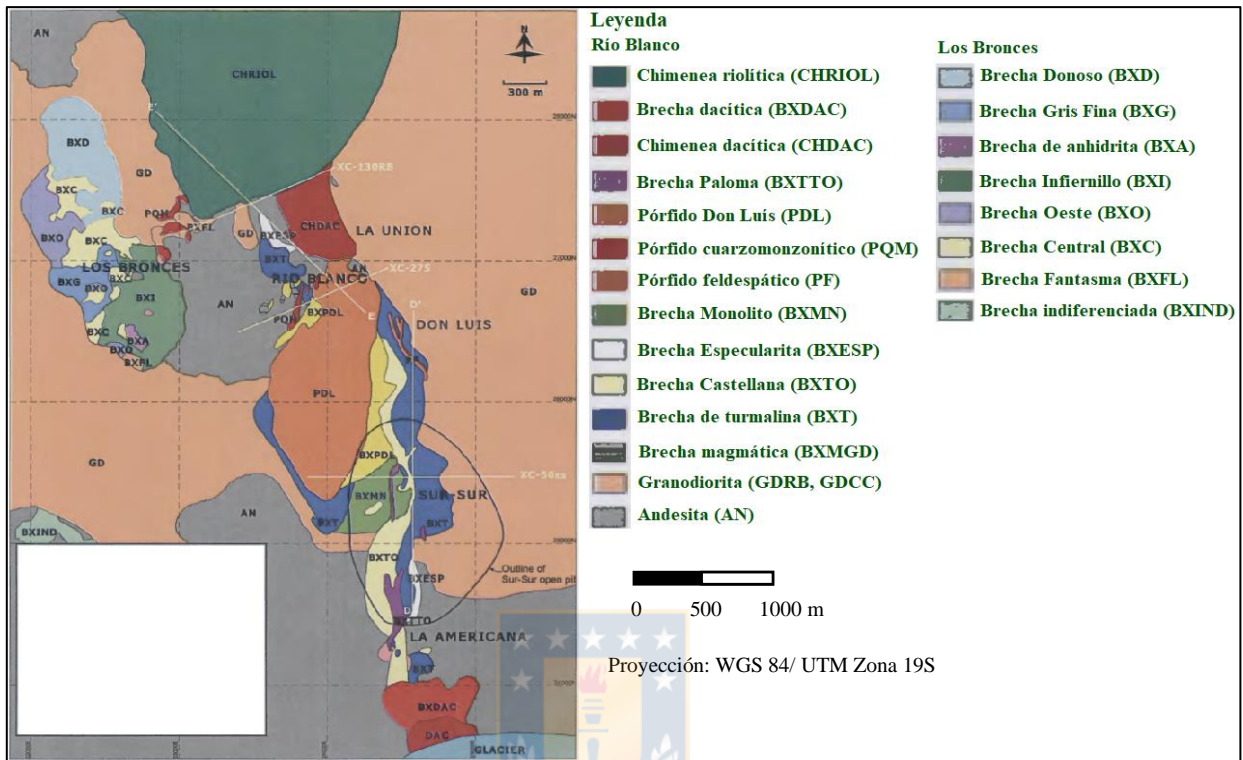


Figura 2.62. Geología del yacimiento Río Blanco - Los Bronces. Modificado de Frikken, 2003.

2.26.1. Alteración Potásica

Esta alteración ocurre principalmente en el área explotada por minería subterránea en Río Blanco. Esta afecta tanto a las rocas granodioríticas del Batolito San Francisco como a las lavas andesíticas que estas intruyen. Se manifiesta por el reemplazo de la mineralogía ígnea primaria por $Bt \pm Mgt \pm Py \pm Cpy \pm Bn$ y la adición de Kfeld, como también la formación de un *stockwork* de vetillas con $Bt \pm Kfeld \pm Qz \pm Mgt \pm Anh \pm Py \pm Cpy \pm Bn \pm Moly$. Además, se reconocen en esta zona una alta porción de brechas mineralizadas del Complejo de Brechas Río Blanco, que consisten en $Bt \pm Anh \pm Tur \pm Hem$ y conteniendo clastos de granodiorita (o cuarzomonzonita) y andesita (Serrano et al., 1996 en Abarzúa, 2014).

2.26.2. Alteración Fílica

La Alteración Fílica se desarrolla espacialmente con los intrusivos de composición cuarzomonzonítica y cuarzomonzodiorítica que cortan a las unidades que conforman el Batolito San Francisco. Se observa una coexistencia espacial con la Alteración Potásica y un control relacionado con los bordes del complejo de brechas (Jara, 2005 en Abarzúa, 2014).

Dos etapas de alteración son reconocidas en los clastos de la Brecha Donoso. La etapa temprana produjo vetillas de Qz - Moly, con un fino halo de Ser o Kfeld, que son truncados en los bordes de los clastos. En contraste, la etapa posterior asociada a la formación de la brecha ataca pervasivamente a los clastos pequeños, pero en los clastos grandes produce un delgado anillo de alteración alrededor de los bordes (Skewes et al., 2003 en Abarzúa, 2014).

Los pórfidos tardíos están variablemente sericitizados y silicificados. Son cortados por vetillas de $Qz \pm Ser \pm Anh \pm Py \pm Cpy \pm Bn$, como también de delgadas vetillas de Kfeld. La alteración también ocurre en la roca huésped a lo largo de los contactos con estos pórfidos tardíos (Serrano et al., 1996 en Abarzúa, 2014).

Abarzúa (2014) reconoce la presencia de Arc producto de esta alteración, pero no distingue específicamente la especie mineralógica.

2.26.3. Alteración Propilítica

En el sector Río Blanco se encuentra restringida a la parte superior del yacimiento en forma de parches alrededor de la Alteración Potásica, por la que es reemplazada progresivamente a medida que aumenta la profundidad. Su paragénesis está dada por Chl - Ep - Cal - Hem - Py - Sid (Serrano et al., 1996 en Abarzúa, 2014).

En el sector Los Bronces, los clastos de la parte más norte y oriental de la Brecha Donoso y los de la parte más norte y occidental de la Brecha Occidente están débil a moderadamente alterados con asociaciones propilíticas. Estos contienen Bt - Hbl - Chl transformados a Ep - Tur \pm Chl (Warnaars et al., 1985 en Abarzúa, 2014).

La Figura 2.63. representa un modelo de alteraciones del sector Don Luís en Río Blanco y la Figura 2.64. el modelo correspondiente para el sector Infiernillo de Los Bronces.

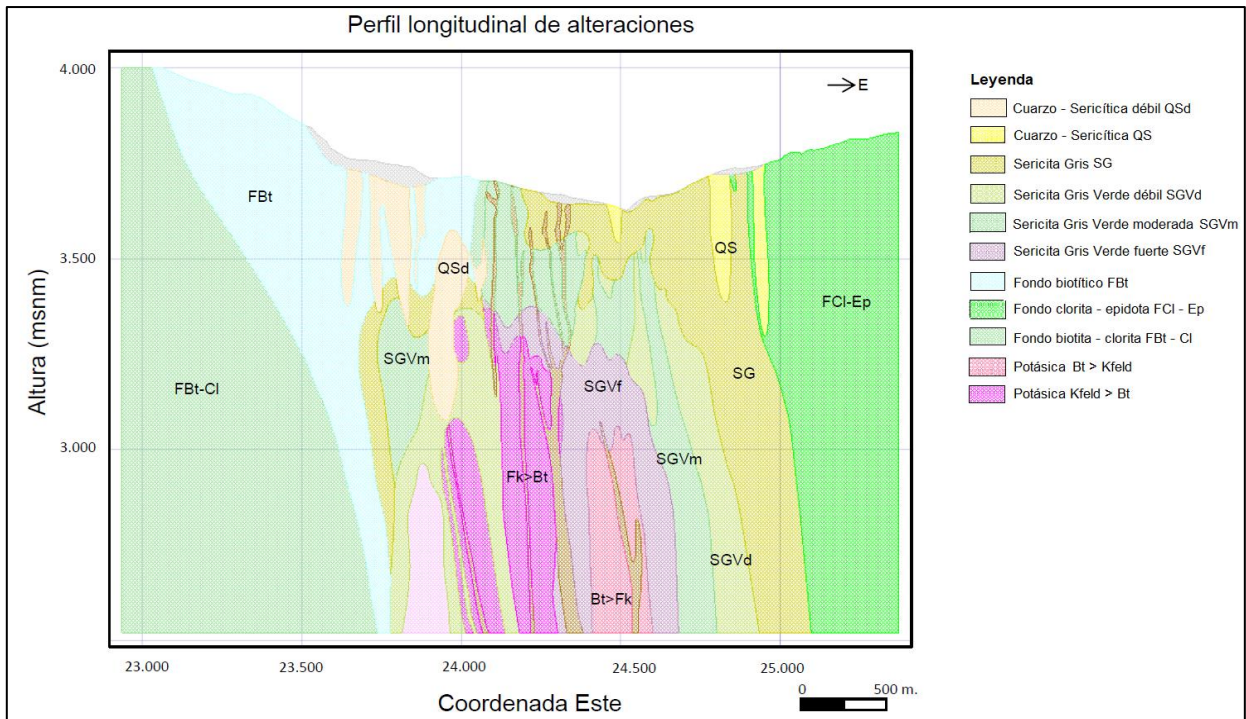


Figura 2.63. Modelo de alteraciones yacimiento Río Blanco en sector Don Luís. Modificado de Spiess, 2017.

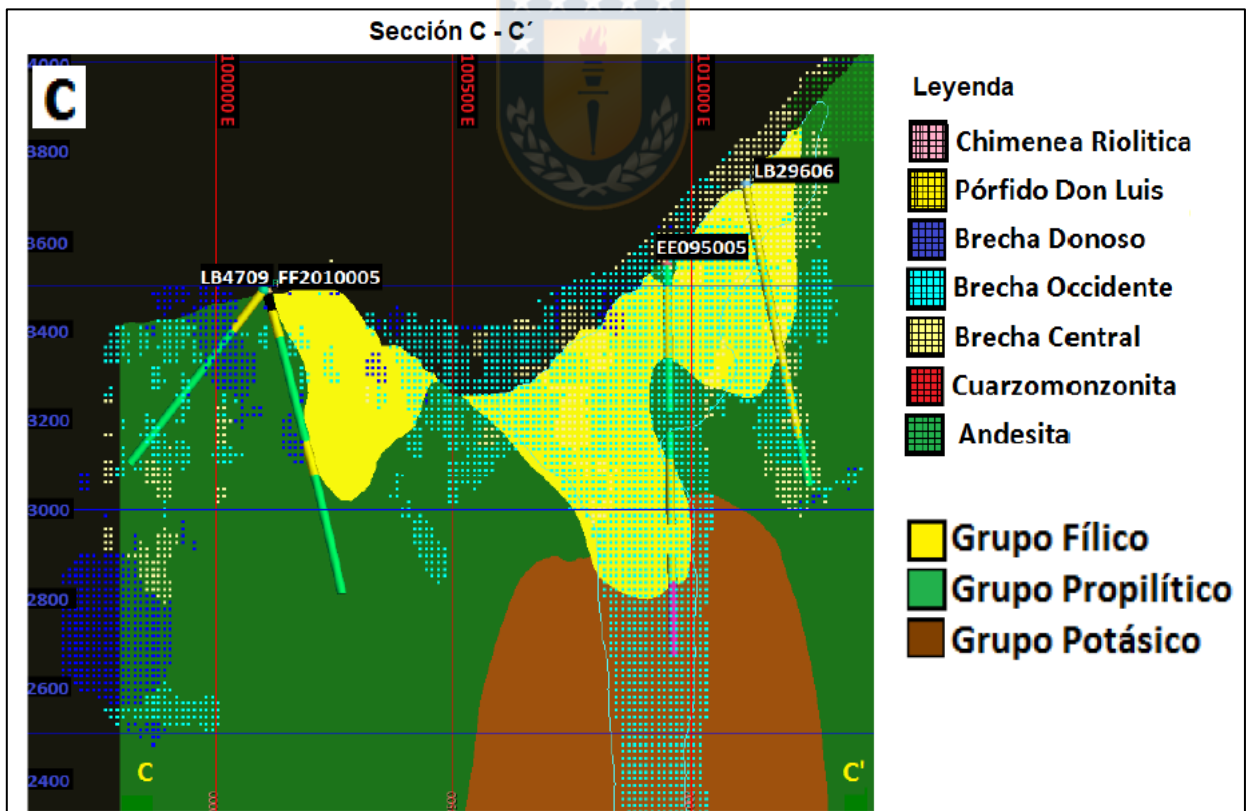


Figura 2.64. Modelo de alteraciones Sección C - C' Los Bronces. Extraído de Abarzúa, 2014.

2.27. El Teniente

El yacimiento El Teniente corresponde a un depósito tipo pórfido cuprífero formado por múltiples eventos hidrotermales, asociados con una secuencia de intrusiones ígneas superpuestas en rocas miocenas del Complejo Volcánico El Teniente (parte superior de la Fm. Farellones) (Stern et al., 2010 en Schulz, 2020). A nivel del distrito el Complejo Volcánico El Teniente es intruido por rocas del Complejo Máfico El Teniente (CMET) y posteriormente por cuerpos félsicos relativamente pequeños (Ossandón, 1974; Camus, 1975; Skewes, 2000 en Schulz, 2020).

La mineralización y alteración es el resultado de una sucesiva intrusión de al menos cinco cuerpos félsicos genéticamente relacionados (Maksaev et al., 2004 en Schulz, 2020) y a la ocurrencia de múltiples brechas ígneas e hidrotermales, que son independientes a las intrusiones félsicas (Figura 2.65.) (Skewes et al., 2002 en Schulz, 2020).

2.27.1. Etapa de Alteración Tardimagmática

Relacionada a la consolidación del *Stock Sewell* y al pórfido dacítico El Teniente. Contiene una etapa temprana de biotitización pervasiva que oblitera gran parte de las rocas del CMET e incluye también, el emplazamiento de brechas con matriz de Bt. La Bt finamente diseminada se encuentra asociada con Anh - Chl - Mgt - Rut - Cpy - Bn (Schulz, 2020).

Posteriormente, la Alteración Potásica es desarrollada por *Stockwork* de Qz - Kfeld - Anh - sulfuros. Gradando a una Alteración Propilítica hacia la periferia, con la ocurrencia de Chl - Ep - Cal (Schulz, 2020).

2.27.2. Etapa de Alteración Hidrotermal Principal

Sobreimpuesta a la etapa anterior y vinculada genéticamente a la reacción de los fluidos tardimagmáticos con aguas meteóricas. Se caracteriza por la ocurrencia de una Alteración Fílica, con cantidades menores de Chl y Anh. Esta alteración se expresa en la ocurrencia de vetillas de Qz - Cpy - Py - Moly subordinada, con halos de ancho variable de Qz - Ser - Chl. Las zonas de mayor intensidad conforman franjas dispuestas en forma simétrica al Pórfido Teniente, en el CMET. También se desarrolla en el *Stock Sewell* como vetillas y en forma masiva (Schulz, 2020).

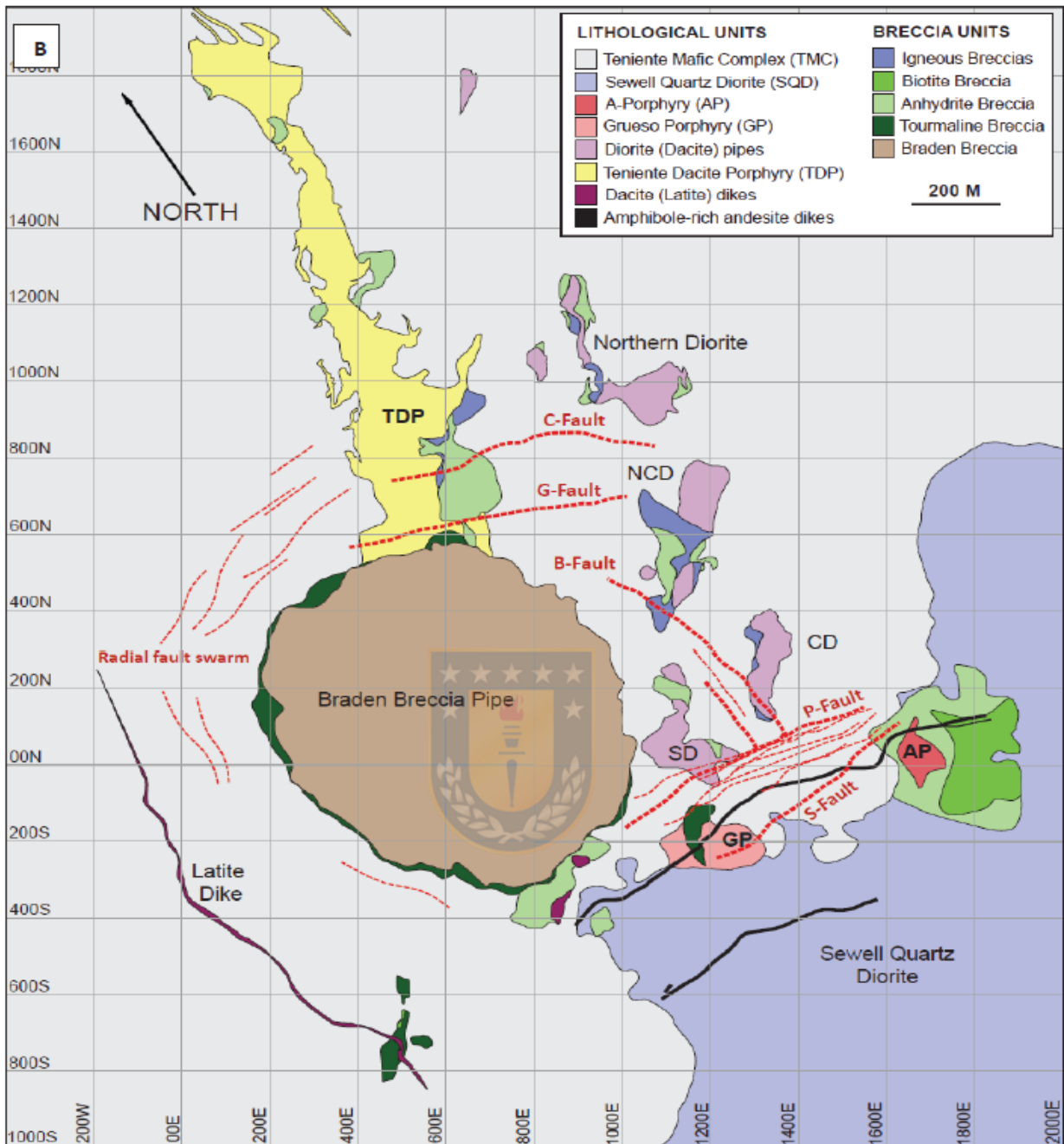


Figura 2.65. Unidades litológicas de El Teniente a una cota de 2165 m s.n.m. Las líneas de color rojo y segmentadas son fallas nombradas según la clasificación otorgada por la división El Teniente de CODELCO. Extraído de Spencer, 2015.

2.27.3. Etapa de Alteración Hidrotermal Tardía

Asociada a la interacción de los fluidos hidrotermales, generados por el emplazamiento de la Brecha Marginal que rodea a la Brecha Braden. Queda expresada por una segunda Alteración Fílica, con vetillas de Anh - Qz - Ser - Tur - Yes - Carb - Bar - Chl - Ep - Cpy - Bn - Py - Moly - sulfosales. Los halos de alteración son más extensos y están caracterizados por un agregado de Qz

- Ser - Chl destruyendo la textura ígnea original de la roca. Se desarrolla a partir de la Brecha Marginal extendiéndose unos 100 - 150 m en una zona concéntrica a ésta (Schulz, 2020).

2.27.4. Etapa Póstuma

Considerada el último evento hipógeno que afectó el depósito. Está relacionada a los fluidos hidrotermales asociados al emplazamiento de la Brecha Braden. Queda manifestada principalmente como una alteración Ser - Cal, restringida a la parte central de la brecha, en forma de vetillas de poca frecuencia (Schulz, 2020).

2.27.5. Alteración Supérgena

La acción de las aguas meteóricas produce la lixiviación de la Anh, presente tanto en vetillas como diseminada y de los sulfuros primarios, principalmente Cpy - Bn - Py. En la zona lixiviada, los sulfuros de Cu originales han sido reemplazados por Lim - Hem. Subyaciendo a esta zona existe un tramos de aproximadamente 80 m de espesor, con minerales oxidados de Cu. Luego, subyaciendo a este último nivel la mineralogía dominante corresponde a Cc - Cv (Skewes et al., 2005 en Schulz, 2020). Los minerales de ganga más abundantes en esta alteración corresponden a Kaol - Mont - Alun - Ser (Schulz, 2020).



3. MARCO TEÓRICO

3.1. Factores Mineros, Metalúrgicos y Geológicos que Afectan el Consumo de Agua en el Procesamiento de Minerales de Cu

3.1.1. Reología de suspensiones

Para entender el comportamiento e impacto de la mineralogía de ganga en el procesamiento de minerales, es necesario considerar los conceptos teóricos de fisicoquímica de superficies.

3.1.1.1. Teoría DLVO

Cuyo nombre deriva en honor a los científicos Boris Derjaguin, Lev Landau, Evert Verwey y Theodor Overbeek, explica la agregación de partículas en suspensiones acuosas a través de fuerzas originadas por cargas superficiales de los sólidos en suspensión.

3.1.1.2. Doble capa eléctrica

Este fenómeno se observa en un sólido (e.g. un mineral) que, al estar inmerso en un medio acuoso, su superficie se carga eléctricamente, provocando la adsorción en ella de iones disueltos con carga opuesta. Actualmente, este fenómeno es explicado por el modelo de Gouy - Chapman - Stern.

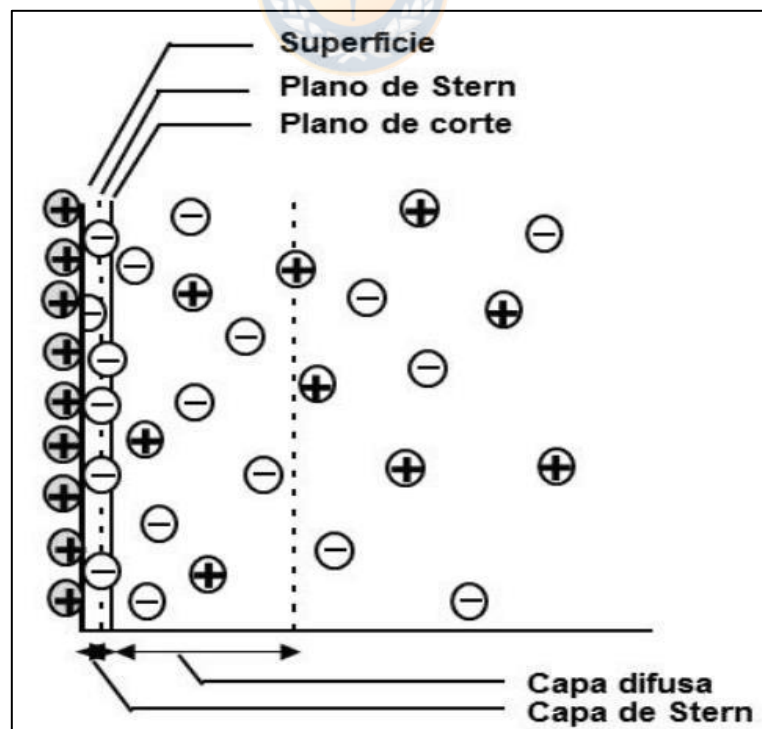


Figura 3.1. Modelo de doble capa eléctrica, extraído de Martínez Luévanos, 2012 en Urrutia, 2016.

En la Figura 3.1. se identifica la capa de Stern, consistente en una distribución equivalente y opuesta de cargas sobre la superficie del mineral de iones determinantes de potencial o adsorbidos específicamente, la que está seguida de una capa denominada difusa, debido a que la agitación térmica de la solución no permite un posicionamiento fijo de cargas (Urrutia, 2016).

Se aprecian también dos planos en el modelo: el plano de Stern y el plano de corte. El primero corresponde al centro eléctrico de los iones determinantes de potencial, este plano marca el límite entre la capa de Stern y la capa difusa. El plano de corte se genera al desplazar la partícula en el fluido, debido a que esta mueve parte del medio circundante con ella, en particular a la capa de Stern y una porción muy pequeña de la capa difusa (Urrutia, 2016).

En el caso de los minerales sumergidos en agua, los iones determinantes de potencial son típicamente H^+ y OH^- , por lo que el potencial queda determinado por el pH de la solución (Urrutia, 2016).

3.1.1.3. Potencial superficial

El potencial superficial corresponde al potencial eléctrico de la superficie del mineral. Este no es medible. Sin embargo, se pueden obtener aproximaciones determinando el punto cero de carga mediante la técnica de titulación de Mular - Roberts y la ecuación de Nernst, por ejemplo. Este punto corresponde al pH al cual la carga neta de la superficie es cero, por igual densidad de adsorción de cargas positivas y negativas (Urrutia, 2016).

3.1.1.4. Potencial zeta

Se entiende por potencial zeta al potencial medido en el plano de corte, el que puede ser determinado mediante diversas técnicas (electroforesis y medición electroacústica) y es de suma utilidad por ser una magnitud medible directamente. Este potencial indica la interacción electrostática de las partículas en suspensión, dado que si los sólidos en suspensión tienen un potencial zeta de valor absoluto menor a 5 mV se espera que fenómenos de coagulación ocurran con rapidez (Urrutia, 2016).

3.1.1.5. Coagulación

Es la agregación de sólidos debido a una fuerza resultante de atracción entre ellos, donde las fuerzas de atracción de corto alcance pasan a dominar la interacción (fuerzas de Van der Waals). Esto ocurre con particular rapidez cuando el potencial zeta de las partículas se encuentra cercano a $0 (\pm 5 \text{ mV})$, por lo que a estos valores de pH se espera una coagulación acelerada de partículas en suspensión (Urrutia, 2016).

De forma adicional, se puede lograr la coagulación por compresión de la doble capa eléctrica agregando iones a la solución. Debido a un incremento en la concentración de iones del medio continuo, se favorece el ingreso de contra - iones a la capa difusa, comprimiendo la doble capa y por lo mismo, disminuyendo las fuerzas repulsivas (Urrutia, 2016).

3.1.1.6. Fuerza de hidratación (no DLVO)

La fuerza de hidratación aparece como una repulsión de corto alcance (<5 nm), en experimentos donde se esperaba que la fuerza atractiva de Van der Waals fuese la que predominara, incluso a veces la fuerza de hidratación es órdenes de magnitud mayor a la repulsión de la doble capa. Existe un fenómeno conocido como hidratación secundaria, que corresponde a la adsorción de iones hidratados en una superficie hidrofóbica, transformándola en hidrofílica, e incluso los cationes son capaces de retener el agua que hidrata. Se ha establecido un orden en la magnitud de fuerzas de hidratación para algunos cationes ($Mg^{2+} > Ca^{2+} > Li^+ \sim Na^+ > K^+ > Cs^+$) (Urrutia, 2016).

3.1.1.7. Floculación

La floculación consiste en agregar partículas de sólidos mediante la acción de polímeros que se adsorben en la superficie de los minerales, “enlazando” unos con otros mediante las estructuras que éstos forman (colas, lazos, trenzas). Este fenómeno se basa en la interacción química y tiene la facultad de formar agregados de partículas más grandes que si ocurre sólo coagulación. En la industria minera, como en el tratamiento de aguas se utilizan estos reactivos (floculantes) para acelerar la sedimentación de partículas (Urrutia, 2016).

3.1.1.8. Comportamiento de fluidos

El comportamiento de los fluidos puede comprenderse a partir de la relación entre dos magnitudes físicas: el esfuerzo de corte ($\tau[N/m^2]$) y la tasa de deformación ($\gamma[s^{-1}]$). También denominada tasa de corte, velocidad de corte o velocidad de cizalle.

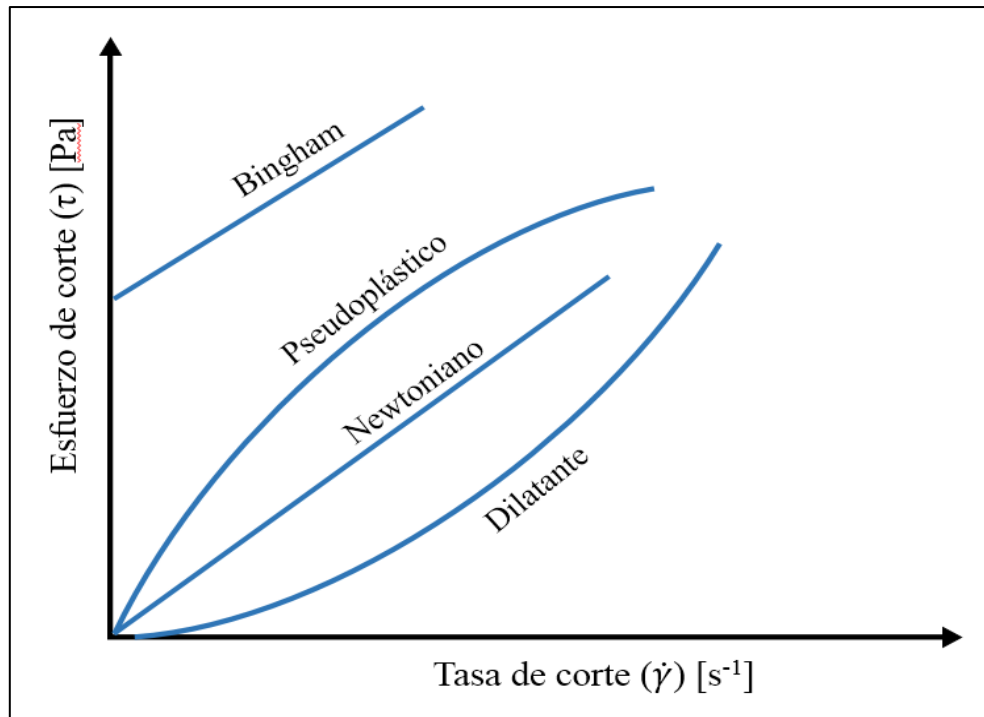


Figura 3.2. Reograma para diferentes tipos de fluidos. Extraído de Urrutia, 2016.

La Figura 3.2. representa los comportamientos más comunes de los fluidos, cada cual posee su correspondiente modelo matemático asociado. Debido a que la viscosidad no es constante en estos fluidos, se prefiere hablar de comportamiento reológico, que es una manera de describir la tendencia que sigue dicha propiedad en función de la tasa o esfuerzo de corte (Urrutia, 2016).

Los fluidos newtonianos exhiben una relación lineal entre la tasa de corte y esfuerzo de corte debido a que la viscosidad es constante. Entre los que poseen relaciones no - lineales están los Dilatantes, cuya viscosidad aumenta con la tasa de corte y los Pseudoplásticos, que presentan una viscosidad decreciente con la tasa de corte. Finalmente, los fluidos Bingham o “plásticos de Bingham” que comienzan a experimentar deformación sobre cierto valor de esfuerzo, denominado límite de fluencia de corte (también límite elástico de corte o esfuerzo de fluencia de corte). Esto indica que, si se les aplica un esfuerzo bajo este valor mínimo, se comportan como sólidos, es decir, presentan una deformación elástica (Urrutia, 2016).

3.1.2. Mineralogía de filosilicatos

Los filosilicatos se construyen de una proporción variable de capas tetraédricas (T) y octaédricas (O), resultando en minerales de estructuras relativamente similares, pero con propiedades físicas y químicas diferentes (Ndlovu et al., 2014).

Deer et al., (1992) propone una clasificación de acuerdo con la proporción de capas T y O y la naturaleza de enlace entre las sucesivas unidades estructurales. Constituyendo así, los grupos minerales de la Serp, Tal/Pyr, micas, Chl y el de Arc. Este último, se puede clasificar en Esmec y Verm (Arc hinchables) e Ill y Kaol (Arc no hinchables) (Figura 3.3).

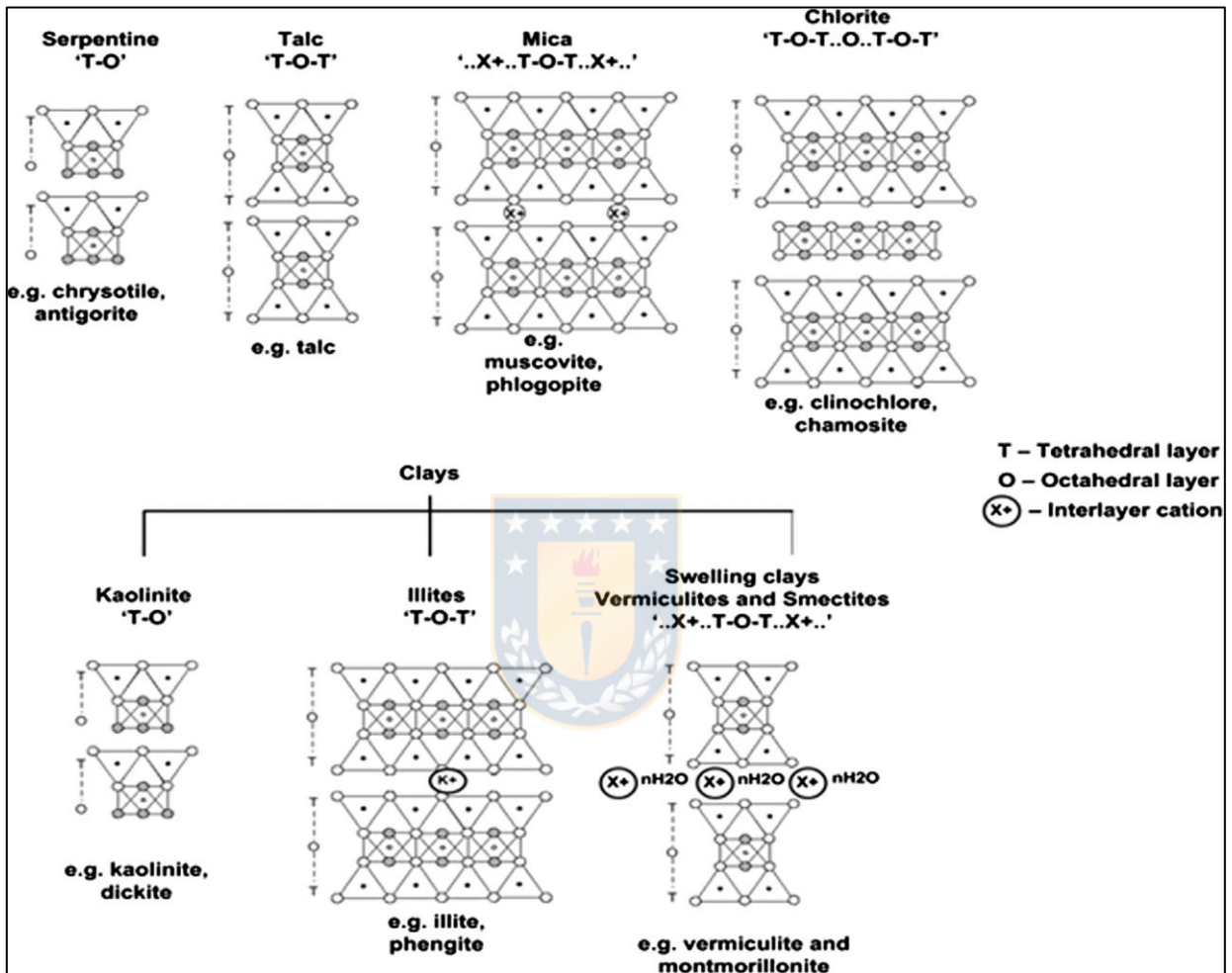


Figura 3.3. Clasificación del grupo mineral filossilicatos. Deer et al., 1992, en Ndlovu et al., 2014.

Los problemas asociados con los filossilicatos son fisicoquímicos y afectan todas las facetas del circuito de procesamiento de minerales, con ineficiencias que surgen durante el beneficio, la deshidratación y eliminación. La naturaleza "pegajosa" de los filossilicatos dificulta el uso de transportadores, rodillos y cribas, y la capacidad de bombeo se reduce significativamente durante la manipulación de materiales. También restringen la percolación y limitan la recuperación durante la lixiviación debido al efecto *preg robbing* (Connelly, 2011a, en Ndlovu et al., 2014). En la conminución, la eficiencia de la molienda se reduce, lo que hace necesario operar el molino a densidades más bajas (Tangsathitkulchai, 2003, en Ndlovu et al., 2014). Altas concentraciones en

filosilicatos disminuyen las cinéticas de flotación, lo que a menudo se manifiesta en un mayor consumo de reactivo y una menor selectividad (Schubert & Bischofberger, 1978; Schubert, 2008; Bakker et al., 2009; Shabalala et al., 2011, en Ndlovu et al., 2014). El riesgo de colapso de pared y fugas también aumenta durante el tratamiento de relaves con alto contenido de filosilicatos, como resultado de su escasa capacidad de deshidratación (de Kretser & Boger, 1992, en Ndlovu et al., 2014).

Ndlovu et al., (2011; 2014) estudiaron el comportamiento de interacciones en suspensiones puras de Kaol, Tal, Verm, Ill y Musc en términos de su carga superficial, la cual es evaluada a través de mediciones del potencial electrocinético zeta y valoraciones potenciométricas, ambas en función del pH. Luego, las correlacionaron con sus propiedades reológicas, incluyendo al Cris (grupo de las Serp), Mont y Qz. Además, las propiedades reológicas de las pulpas minerales son altamente dependientes de las características propias de cada mineral en suspensión, tales como: tamaño, forma, concentración, entre otros.

Una divergencia entre los valores de punto isoeléctrico electrocinético (i.e.p) y punto de carga cero (p.z.c) para un mineral nos indica el grado de anisotropía de carga. Por lo que, a mayor divergencia es mayor el grado de anisotropía y desviación de comportamiento respecto a un comportamiento isotrópico (Ndlovu et al., 2014).

El grado de carga superficial en los bordes y caras de las estructuras cristalinas depende del pH de la solución y determina las interacciones posibles que pueden ocurrir (Ndlovu et al., 2011). Luckam & Rossi (1999) establecen 3 modos principales de interacción de partículas laminares: *face - face* (FF), *edge - edge* (EE) y *edge - face* (EF). Las interacciones FF conducen a la formación de agregados con estructura lamelar y bajo límite de fluencia. Mientras que, las interacciones EE y EF resultan en la formación una estructura tridimensionalmente más voluminosa o “*house of cards*” que es reológicamente más complejo y difícil de manipular.

El comportamiento de las partículas en suspensión es examinado a un valor de pH = 9 porque es una condición común en la que muchos procesos de flotación son llevados a cabo (Ndlovu et al., 2011).

La Verm exhibe una cercanía al balance de cargas positivas y negativas en sus bordes y caras. Por lo que si ocurre una interacción EF la suspensión coagulará con un alto límite de fluencia (Ndlovu et al., 2011).

La Musc presenta menores diferencias de cargas positivas y negativas con tres escenarios posibles: interacciones EF de igual carga y negativa, resultando en un sistema disperso; interacciones EE con una débil carga negativa, lo que podría reflejarse en una coagulación de la suspensión; y finalmente, una combinación de los dos escenarios anteriormente descritos, con dispersión, coagulación y un bajo límite de fluencia (Ndlovu et al., 2011).

La Kaol se caracteriza por poseer una carga superficial negativa, lo que se expresa en dispersión debido a fuerzas repulsivas en interacciones EF e interacciones débiles EE con un bajo límite de fluencia. Sin embargo, una baja cristalinidad implicaría la ocurrencia de bordes rotos y rugosidades en las caras cristalinas, lo que consecuentemente, propicia fuertes interacciones EE, posibles EF y un alto límite de fluencia. Entonces, el grado de cristalinidad es sumamente importante en el comportamiento de las suspensiones, definiendo un gran límite de fluencia o dispersión de las partículas acorde a sus propiedades de carga superficial (Ndlovu et al., 2014).

La Ill presenta en su mayoría cargas negativas, con una consiguiente dispersión y débiles interacciones EE. Sin embargo, debido a su alta relación de aspecto (gran extensión lateral en relación con el espesor) la aglomeración de interacciones FF puede ser el aspecto más importante en el comportamiento en suspensión, con la posible transición a interacciones EE por el consecuente apilamiento de capas y el incremento del espesor de los bordes (Ndlovu et al., 2014).

El Tal exhibe una cercanía al balance entre cargas negativas y positivas de caras y bordes, lo que resulta en interacciones EE y EF que propician la coagulación y un alto límite de fluencia (Ndlovu et al., 2014).

Luego, al estimar el comportamiento de las partículas bajo las condiciones de pH comunes para el procesamiento de minerales, es posible correlacionarlos con las propiedades reológicas (límite de fluencia y viscosidad) para así obtener una comprensión del tipo más probable de empaquetamiento y comportamiento de suspensiones puras (Ndlovu et al., 2014).

La Figura 3.4. establece una comparación entre el límite de fluencia Bingham y el porcentaje de sólidos para cada filosilicato en estudio, en la cual, quizás el resultado más relevante de tal comparación para la industria de procesamiento de minerales es la concentración crítica de cada filosilicato. Esta es la concentración sobre la cual se desarrollarán inevitablemente problemas en el procesamiento y puede ser estimada a partir de concentraciones que signifiquen incrementos exponenciales de límite de fluencia y viscosidad (Ndlovu et al., 2014).

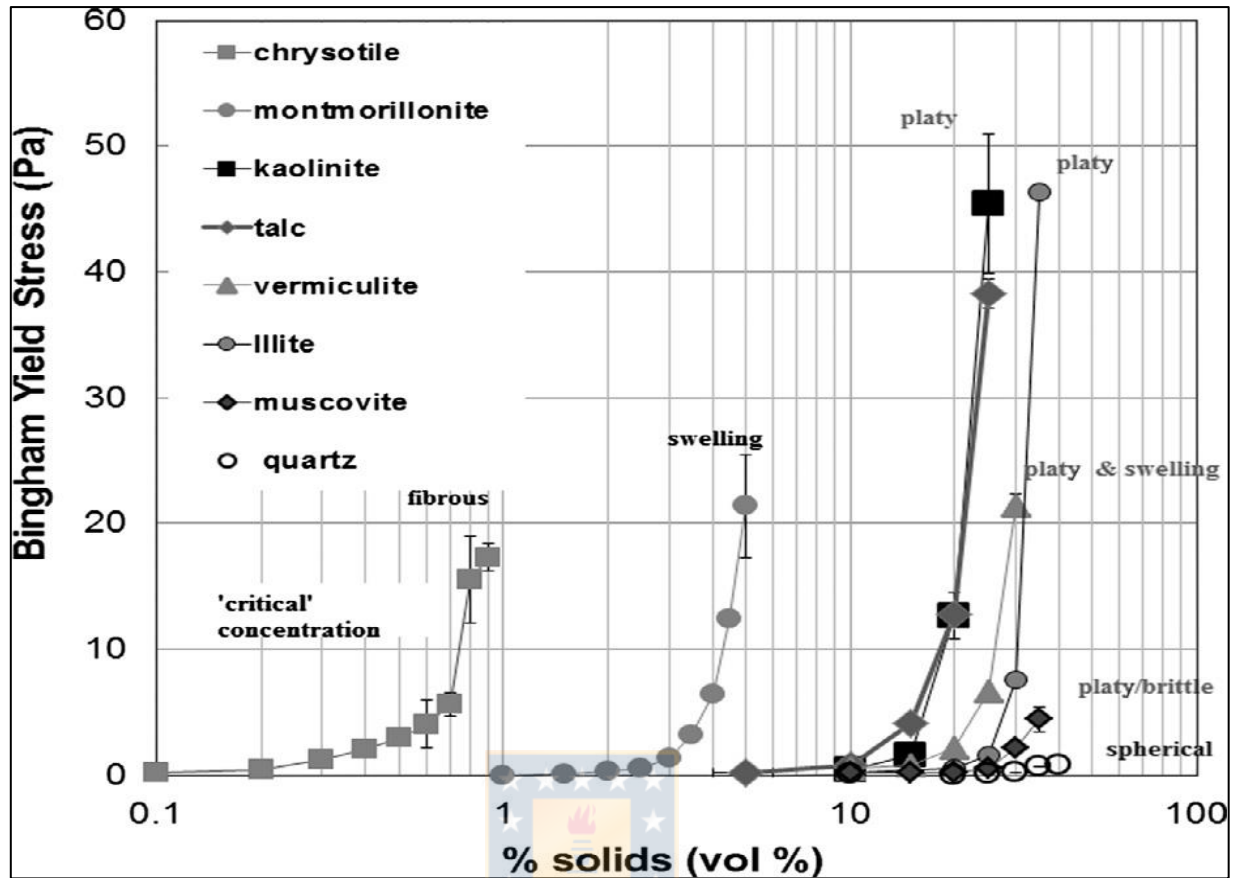


Figura 3.4. Comparación entre el límite de fluencia Bingham y el porcentaje de sólidos en suspensión para cada filosilicato en estudio. Las barras de error representan el intervalo de confianza del 95% de los valores promedio. Extraído de Ndlovu et al., 2014.

El Cris evidencia una concentración crítica baja equivalente a un 0,7% de sólidos, mientras que la Mont es problemática hacia valores cercanos y por sobre el 4% de sólidos. El comportamiento inusual a bajas concentraciones observado para estos minerales es atribuido al hábito fibroso del Cris y a la alta capacidad de hinchamiento de la Mont (Ndlovu et al., 2014).

La Kaol y el Tal presentan una concentración crítica a un 20% de sólidos, la Verm a un 25%, la Ill a un 30% y la Musc a un 35%. Las variaciones obtenidas se relacionan a las variaciones en las propiedades de cada mineral, tales como: anisotropía de carga, capacidad de hinchamiento, cristalinidad y morfología de superficie (Ndlovu et al., 2014).

La Figura 3.5. grafica una comparación entre la viscosidad de Bingham y el porcentaje de sólidos de cada mineral. En el gráfico (a) se observa el efecto dramático del Cris en las suspensiones, aumentando la viscosidad de este muy por sobre los otros minerales en estudio. El gráfico (b) describe la viscosidad de los otros minerales, los cuales poseen un comportamiento más viscoso que el Qz (Ndlovu et al., 2014).

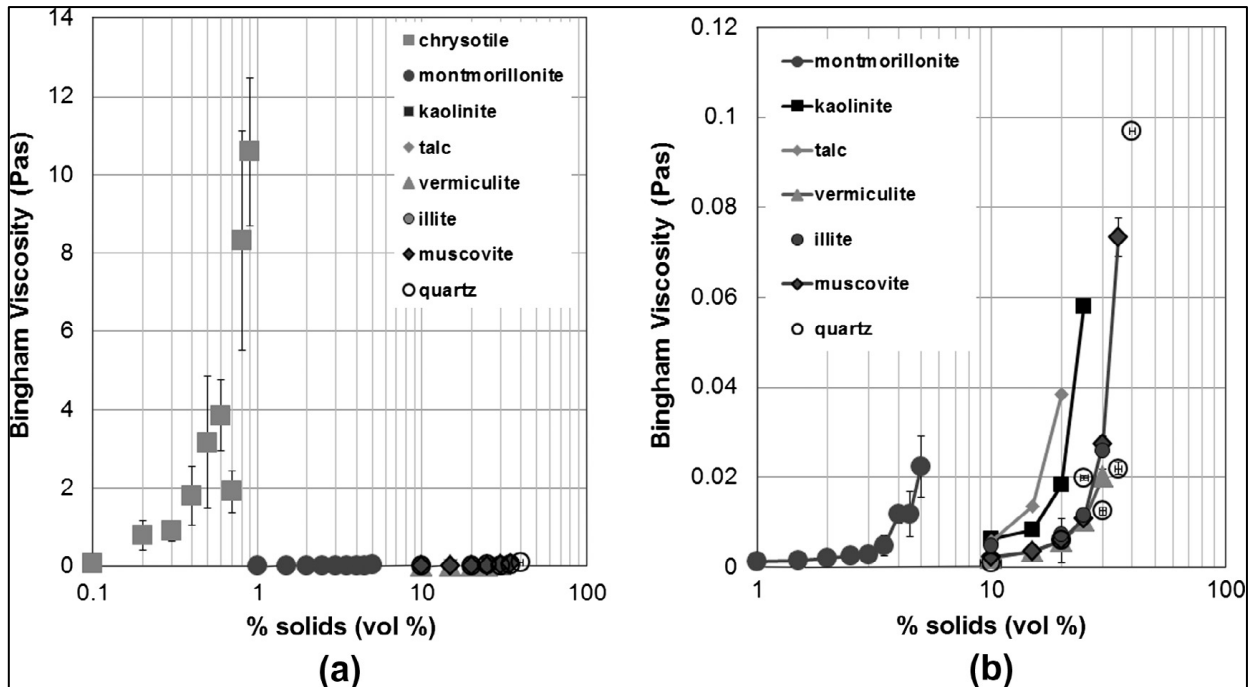


Figura 3.5. Comparación entre viscosidad de Bingham y porcentaje de sólidos en suspensión para cada filossilicato en estudio. Las barras de error representan el intervalo de confianza del 95% de los valores promedio. Extraído de Ndlovu et al., 2014.

3.1.3. Ley de Cu y tasa de recirculación de agua

Las empresas mineras están constantemente obligadas a mejorar la eficiencia de extracción de los recursos y a reducir la huella ambiental (Norgate et al., 2007, en Cejas, 2018) sobre todo porque se enfrentan al deterioro de factores naturales con el tiempo, tales como la reducción de la ley de los metales en los yacimientos, entre otros factores (Crowson, 2012; Lagos et al., 2018, en Cejas, 2018).

La disminución de las leyes de metal es uno de los principales factores que influyen el impacto ambiental de la producción de Cu (Norgate et al., 2007, en Cejas, 2018). Otros factores son la remoción de mayor cantidad de material estéril, mayor generación y deposición de relaves, perturbación prolongada del sector aledaño a la faena, aumento del consumo de energía eléctrica, explosivos, diésel, agua y otros insumos (Northey et al., 2014, en Cejas, 2018).

La tasa de recirculación de agua corresponde a la cantidad de agua reutilizada dividida por el agua total utilizada. Esta tasa teóricamente puede variar entre 0% y 100%, pero no puede llegar a este último valor ya que una parte del agua se pierde en filtraciones, evaporación; y retención en material de las colas. En 2016, las plantas de concentración chilenas registraron una tasa de

recirculación de 71% (COCHILCO, 2017, en Cejas, 2018), de la cual, se estima, la mayor parte proviene de la disposición de los relaves (Gunson et al., 2012, en Cejas, 2018).

Cejas (2018) relaciona el consumo de agua fresca con la cantidad de agua requerida para procesar el mineral y con otros parámetros de la operación para 10 faenas pertenecientes a la gran minería.

$$w_c \left(\frac{m^3}{t \text{ Cu}} \right) = \frac{w_p(1-R)}{F_R g} \quad (\text{Ecuación 3.1.})$$

Donde w_c corresponde a la captación de agua estimada por unidad de Cu contenido, w_p es el consumo unitario de agua de la faena para procesar el mineral, F_R es la recuperación en el proceso de concentración y R es la fracción de recirculación.

El promedio de las minas estudiadas se expresa de la siguiente manera:

$$w_c \left(\frac{m^3}{t \text{ Cu}} \right) = \frac{98}{g} \quad R^2 = 0.6 \quad (\text{Ecuación 3.2.})$$

Del modelo obtenido (Figura 3.6.), se observa un comportamiento de tipo potencial y con consumo decreciente respecto a una ley de Cu mayor. La explicación teórica de esta curva está dada por múltiples factores, el principal es el efecto másico, por el cual para obtener una misma cantidad de Cu refinado con una ley menor se debe procesar mayor cantidad de material (Cejas, 2018).

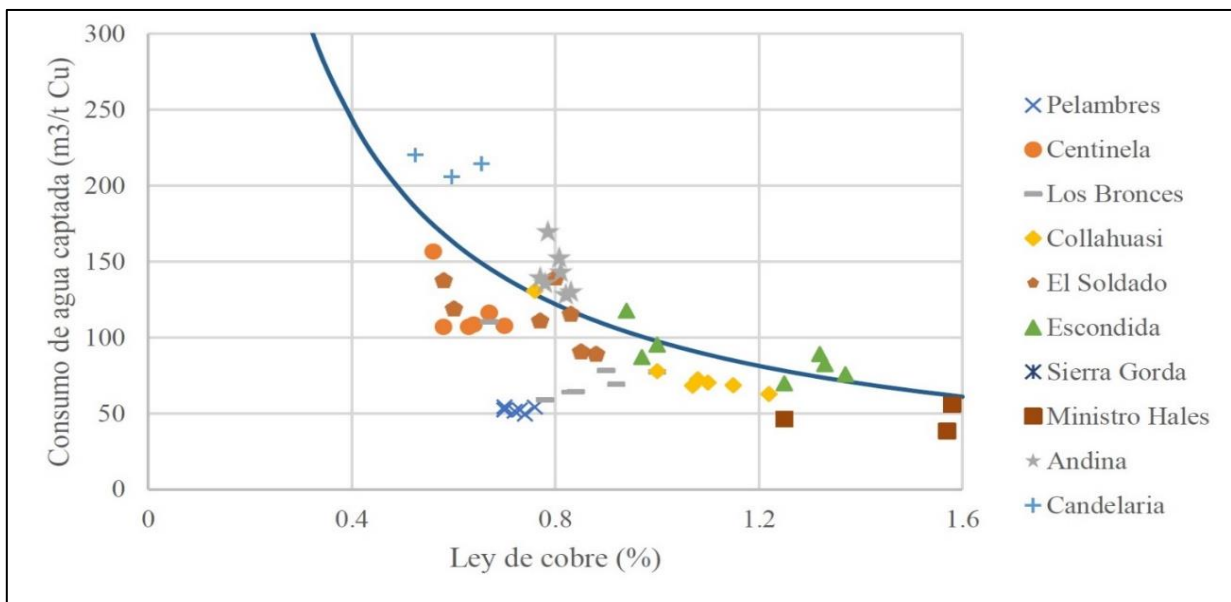


Figura 3.6. Consumo de agua captada por tonelada de Cu producido versus ley de cabeza. Cejas, 2018.

Se observa gran dispersión en los datos debido a las diferencias entre las diversas operaciones. Pelambres y Los Bronces, por ejemplo, consumen mucho menos agua que lo estimado por el modelo de la ecuación 3.2., mientras que otras minas como Andina y Candelaria consumen agua muy por sobre dicho modelo (Cejas, 2018). Esto ocurre debido a que Pelambres y Los Bronces tienen recirculaciones mucho mayores al promedio correspondientes a 85% (Antofagasta Minerals S.A., 2014, en Cejas, 2018) y 79% (Anglo American, 2015, en Cejas, 2018) en 2014, respectivamente. Andina, en cambio, tiene una tasa de recirculación de 48,7% para el mismo año (Codelco, 2015, en Cejas, 2018). Aquellas minas que presentan menores tasas de recirculación suelen tener su planta concentradora a mucho mayor altura que los relaves y/o espesadores, lo que significa un alto costo energético e inversional para bombear el agua de vuelta al proceso, siendo económicamente inconveniente. Otros factores que influyen la tasa de captación de agua y/o el porcentaje de recirculación son: la humedad ambiental de la ubicación geográfica y la consecuente evaporación en los relaves; la disponibilidad de agua en la zona que determina el estrés regional y el grado de gestión del recurso hídrico; la cercanía a la costa y elevación de las instalaciones, variables que afectan el costo de bombeo de agua de mar (COCHILCO, 2017, en Cejas, 2018).



4. RESULTADOS

4.1. Índice Mineralógico

De acuerdo con el comportamiento reológico de los filosilicatos y sus asociaciones se establece un índice mineralógico (Tabla 4.1.).

Tabla 4.1. Índice mineralógico de asociaciones mineralógicas de filosilicatos y Qz según su comportamiento reológico.

Índice Mineralógico	Asociación mineralógica	Reología
A	Micas	Bueno (baja viscosidad)
	Qz - Illita	
	Qz - Micas	
	Qz - Micas - Illita	
B	Caolinita	Baja viscosidad en condiciones de alto cizalle
	Micas - Caolinita - Talco	
	Micas - Talco	
	Qz - Micas - Caolinita	
	Qz - Micas - Caolinita - Talco	
	Qz - Micas - Illita - Caolinita	
C	Qz - Esmectitas	Malo (alta viscosidad)
	Qz - Micas - Illita - Caolinita - Esmectitas	
	Qz - Micas - Illita - Caolinita - Talco - Esmectitas	

Esta clasificación nos permite agrupar a los yacimientos en estudio según su asociación mineralógica de filosilicatos (Arc) presentes de forma simple. El índice asignado a cada yacimiento se muestra en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Clasificación de faenas mineras de acuerdo con su contenido de filosilicatos o índice mineralógico.

Macrozona	Faena	Índice mineralógico
Norte	Quebrada Blanca	B
	Cerro Colorado	C
	Collahuasi	C
	El Abra	B
	Radomiro Tomic	C
	Chuquicamata	B
	Ministro Hales	B
	Antucoya	B
	Spence	B
	Sierra Gorda	B
	Centinela	C
	Gabriela Mistral	C
	Lomas Bayas	C
	Zaldívar	A
	Escondida	B
	Candelaria	A
	Caserones	B
	Salvador	B
	Carmen de Andacollo	B
	Los Pelambres	A
Centro	El Soldado	C
	Andina	B
	Los Bronces	B
	El Teniente	B

4.2. Cálculo *Make up* Periodo 2016 - 2019

Este indicador permite estimar la eficiencia del proceso en materia de recursos hídricos. Considera la cantidad de agua que debe entrar al proceso independientemente del origen hídrico (aguas continentales y agua de mar) para procesar una tonelada de mineral (Figura 4.1.), excluyendo las aguas recirculadas (COCHILCO, 2020a).

$$\mathbf{Make\ up}_{concentración/hidrometalurgia} = \frac{\mathbf{Cantidad\ de\ agua}}{\mathbf{tonelada\ de\ mineral\ procesado}} \left[\frac{\mathbf{m^3}}{\mathbf{ton}} \right]$$

Figura 4.1. Fórmula *Make up* por proceso. COCHILCO, 2020a.

Para el cálculo del *Make up* por proceso se consideraron los siguientes aspectos:

- El agua consumida por faena disponible se obtuvo de la plataforma de aguas elaborada por el Consejo Minero (2021). Esta se expresa en m³/s y es clasificada según origen y tipo en: agua superficial, subterránea, aguas del minero, de terceros, agua de mar y desalada.

- La cantidad de agua utilizada por proceso, es decir, en concentración e hidrometalurgia durante un día ($\text{m}^3/\text{día}$) para operaciones que tratan sus minerales mediante estas dos técnicas, se calculó de acuerdo con las estadísticas nacionales de COCHILCO, 2020a (Tabla 4.3.):

Tabla 4.3. Estadísticas nacionales consumo de agua por proceso periodo 2016 - 2019. COCHILCO, 2020a.

Proceso/año	2016	2017	2018	2019
Concentración	71,30%	67,10%	60,50%	64,20%
Hidrometalurgia	14,20%	13,90%	12,90%	13,60%

- Las faenas que llevan a cabo solo un proceso de tratamiento de minerales, se consideró la diferencia entre el total de agua consumida y el porcentaje del aspecto “otros” declarado por COCHILCO, 2020a (Tabla 4.4.):

Tabla 4.4. Estimación de consumo de agua por proceso único de tratamiento periodo 2016 - 2019. COCHILCO, 2020a.

Proceso/año	2016	2017	2018	2019
Concentración/Hidrometalurgia	90,20%	85,10%	84,40%	88,80%

- Para aquellas operaciones que resultasen en valores de *Make up* muy distantes al promedio nacional: $0,520 \text{ m}^3/\text{t}$ en concentración y $0,136 \text{ m}^3/\text{t}$ en hidrometalurgia (COCHILCO, 2020a), se variaron arbitrariamente los porcentajes consumidos en cada proceso para así obtener valores relativamente coherentes. Este fenómeno se observó en Spence, Centinela hidrometalurgia, Lomas Bayas, Zaldívar, Caserones, Salvador, Carmen de Andacollo y Los Pelambres.
- La capacidad de procesamiento de las plantas de beneficio en toneladas durante un día ($\text{t}/\text{día}$) se recopiló a partir de la información disponible en el anuario de minería (SERNAGEOMIN, 2020a) y el E.I.A. de El Salvador (GAC, 2018).

De esta forma, se obtuvieron resultados de este indicador para 24 faenas de Cu distribuidas en las macrozonas Norte y Centro de Chile.

4.2.1. Macrozona Norte

4.2.1.1. Quebrada Blanca

Ubicación: Región de Tarapacá.

Tabla 4.5. *Make up* y producción de Cu Quebrada Blanca periodo 2016 - 2019.

Faena	Ítem/Año	2016	2017	2018	2019
Quebrada Blanca	Consumo de agua (m ³ /día)	6.048	4.406	4.752	10.385
	Producción de Cu (t/año)	34.700	23.400	25.500	21.100
	Capacidad tratamiento lixiviación (t/día)	30.000	30.000	30.000	30.000
	Make up (m³/t)	0,182	0,125	0,134	0,307

4.2.1.2. Cerro Colorado

Ubicación: Región de Tarapacá.

Tabla 4.6. *Make up* y producción de Cu Cerro Colorado periodo 2016 - 2019.

Faena	Ítem/Año	2016	2017	2018	2019
Cerro Colorado	Consumo de agua (m ³ /día)	10.973	10.368	11.146	10.627
	Producción de Cu (t/año)	74.000	66.200	66.200	71.700
	Capacidad tratamiento lixiviación (t/día)	71.644	71.644	71.644	71.644
	Make up (m³/t)	0,138	0,123	0,131	0,132

4.2.1.3. Collahuasi

Ubicación: Región de Tarapacá.

Tabla 4.7. *Make up* y producción de Cu Collahuasi periodo 2016 - 2019.

Faena	Ítem/Año	2016	2017	2018	2019
Collahuasi	Consumo de agua (m ³ /día)	94.781	93.744	90.806	94.090
	Producción de Cu (t/año)	506.500	524.000	559.200	565.400
	Capacidad tratamiento flotación (t/día)	177.314	177.314	177.314	177.314
	Make up (m³/t)	0,482	0,450	0,432	0,471

4.2.1.4. El Abra

Ubicación: Región de Antofagasta.

Tabla 4.8. *Make up* y producción de Cu El Abra periodo 2016 - 2019.

Faena	Ítem/Año	2016	2017	2018	2019
El Abra	Consumo de agua (m ³ /día)	19.008	18.835	16.676	18.066
	Producción de Cu (t/año)	99.900	78.400	91.300	81.900
	Capacidad tratamiento lixiviación (t/día)	125.894	125.894	125.894	125.894
	Make up (m³/t)	0,136	0,127	0,112	0,127

4.2.1.5. Radomiro Tomic

Ubicación: Región de Antofagasta.

Tabla 4.9. *Make up* y producción de Cu Radomiro Tomic periodo 2016 - 2019.

Faena	Ítem/Año	2016	2017	2018	2019
Radomiro Tomic	Consumo de agua (m ³ /día)	23.414	24.970	25.402	27.259
	Producción de Cu (t/año)	318.300	318.900	332.700	266.400
	Capacidad tratamiento lixiviación (t/día)	180.000	180.000	180.000	180.000
	Make up (m³/t)	0,117	0,118	0,119	0,134

4.2.1.6. Chuquicamata

Ubicación: Región de Antofagasta.

Tabla 4.10. *Make up* y producción de Cu Chuquicamata periodo 2016 - 2019.

Faena	Ítem/Año	2016	2017	2018	2019
Chuquicamata	Consumo de agua (m ³ /día)	116.726	132.624	165.629	172.541
	Producción de Cu (t/año)	302.000	330.900	320.700	385.300
	Capacidad tratamiento lixiviación (t/día)	128.700	128.700	128.700	128.700
	Make up (m³/t)	0,127	0,144	0,166	0,177
	Capacidad tratamiento concentración (t/día)	226.199	226.199	226.199	226.199
	Make up (m³/t)	0,366	0,393	0,443	0,490

4.2.1.7. Ministro Hales

Ubicación: Región de Antofagasta.

Tabla 4.11. *Make up* y producción de Cu Ministro Hales periodo 2016 - 2019.

Faena	Ítem/Año	2016	2017	2018	2019
Ministro Hales	Consumo de agua (m ³ /día)	36.461	38.448	34.906	32.659
	Producción de Cu (t/año)	237.000	215.100	195.500	151.800
	Capacidad tratamiento concentración (t/día)	50.000	50.000	50.000	50.000
	Make up (m³/t)	0,658	0,654	0,589	0,580

4.2.1.8. Antucoya

Ubicación: Región de Antofagasta.

Tabla 4.12. *Make up* y producción de Cu Antucoya periodo 2016 - 2019.

Faena	Ítem/Año	2016	2017	2018	2019
Antucoya	Consumo de agua (m ³ /día)	16.243	18.144	20.131	19.094
	Producción de Cu (t/año)	66.200	80.500	72.200	71.900
	Capacidad tratamiento lixiviación (t/día)	100.000	100.000	100.000	100.000
	Make up (m³/t)	0,147	0,154	0,170	0,170

4.2.1.9. Spence

Ubicación: Región de Antofagasta.

Tabla 4.13. *Make up* y producción de Cu Spence periodo 2016 - 2019.

Faena	Ítem/Año	2016	2017	2018	2019
Spence	Consumo de agua (m ³ /día)	17.626	17.194	16.848	19.354
	Producción de Cu (t/año)	167.400	198.600	176.400	193.400
	Capacidad tratamiento lixiviación (t/día)	60.000	60.000	60.000	60.000
	Make up (m³/t)	0,206	0,201	0,197	0,226

4.2.1.10. Sierra Gorda

Ubicación: Región de Antofagasta.

Tabla 4.14. *Make up* y producción de Cu Sierra Gorda periodo 2016 - 2019.

Faena	Ítem/Año	2016	2017	2018	2019
Sierra Gorda	Consumo de agua (m ³ /día)	64.627	64.714	78.365	72.490
	Producción de Cu (t/año)	98.100	101.700	101.900	114.000
	Capacidad tratamiento concentración (t/día)	110.000	110.000	110.000	110.000
	Make up (m³/t)	0,530	0,501	0,601	0,585

4.2.1.11. Centinela

Ubicación: Región de Antofagasta.

Tabla 4.15. *Make up* y producción de Cu Centinela periodo 2016 - 2019.

Faena	Ítem/Año	2016	2017	2018	2019
Centinela	Consumo de agua (m ³ /día)	83.981	84.845	87.264	84.154
	Producción de Cu (t/año)	236200	228300	248000	276600
	Capacidad tratamiento lixiviación (t/día)	28.767	28.767	28.767	28.767
	Make up (m³/t)	0,175	0,177	0,182	0,176
	Capacidad tratamiento concentración (t/día)	100.000	100.000	100.000	100.000
	Make up (m³/t)	0,599	0,569	0,528	0,540

4.2.1.12. Gabriela Mistral

Ubicación: Región de Antofagasta.

Tabla 4.16. *Make up* y producción de Cu Gabriela Mistral periodo 2016 - 2019.

Faena	Ítem/Año	2016	2017	2018	2019
Gabriela Mistral	Consumo de agua (m ³ /día)	17.971	20.390	18.144	18.835
	Producción de Cu (t/año)	121.700	122.700	107.300	104.100
	Capacidad tratamiento lixiviación (t/día)	128.625	128.625	128.625	128.625
	Make up (m³/t)	0,126	0,135	0,119	0,130

4.2.1.13. Lomas Bayas

Ubicación: Región de Antofagasta.

Tabla 4.17. *Make up* y producción de Cu Lomas Bayas periodo 2016 - 2019.

Faena	Ítem/Año	2016	2017	2018	2019
Lomas Bayas	Consumo de agua (m ³ /día)	14.947	14.947	16.848	-
	Producción de Cu (t/año)	80.100	78.000	72.700	78.900
	Capacidad tratamiento lixiviación (t/día)	158.782	158.782	158.782	158.782
	Make up (m³/t)	0,089	0,089	0,101	-

4.2.1.14. Zaldívar

Ubicación: Región de Antofagasta.

Tabla 4.18. *Make up* y producción de Cu Zaldívar periodo 2016 - 2019.

Faena	Ítem/Año	2016	2017	2018	2019
Zaldívar	Consumo de agua (m ³ /día)	18.317	19.181	19.829	18.317
	Producción de Cu (t/año)	103.400	103.300	94.500	116.100
	Capacidad tratamiento lixiviación (t/día)	70.000	70.000	70.000	70.000
	Make up (m³/t)	0,188	0,197	0,204	0,188
	Capacidad tratamiento concentración (t/día)	4.500	4.500	4.500	4.500
	Make up (m³/t)	0,611	0,639	0,661	0,611

4.2.1.15. Escondida

Ubicación: Región de Antofagasta.

Tabla 4.19. *Make up* y producción de Cu Escondida periodo 2016 - 2019.

Faena	Ítem/Año	2016	2017	2018	2019
Escondida	Consumo de agua (m ³ /día)	195.005	203.126	281.491	277.171
	Producción de Cu(t/año)	1.002.000	925.400	1.242.700	1.187.800
	Capacidad tratamiento lixiviación (t/día)	231.166	231.166	231.166	231.166
	Make up (m³/t)	0,120	0,122	0,157	0,163
	Capacidad tratamiento concentración (t/día)	245.055	245.055	245.055	245.055
	Make up (m³/t)	0,567	0,556	0,695	0,726

4.2.1.16. El Salvador

Ubicación: Región de Atacama.

Tabla 4.20. *Make up* y producción de Cu El Salvador periodo 2016 - 2019.

Faena	Ítem/Año	2016	2017	2018	2019
El Salvador	Consumo de agua (m ³ /día)	66.355	66.355	61.603	51.062
	Producción de Cu (t/año)	59.800	62.000	60.800	50.600
	Capacidad tratamiento lixiviación (t/día)	15.000	15.000	15.000	15.000
	Make up (m³/t)	0,265	0,265	0,246	0,204
	Capacidad tratamiento concentración (t/día)	32.000	32.000	32.000	32.000
	Make up (m³/t)	0,829	0,829	0,770	0,638

4.2.1.17. Candelaria

Ubicación: Región de Atacama.

Tabla 4.21. *Make up* y producción de Cu Candelaria periodo 2016 - 2019.

Faena	Ítem/Año	2016	2017	2018	2019
Candelaria	Consumo de agua (m ³ /día)	33.437	33.437	30.931	23.414
	Producción de Cu (t/año)	135.400	150.300	101.700	111.400
	Capacidad tratamiento concentración (t/día)	69.408	69.408	69.408	69.408
	Make up (m³/t)	0,435	0,410	0,376	0,300

4.2.1.18. Caserones

Ubicación: Región de Atacama.

Tabla 4.22. *Make up* y producción de Cu Caserones periodo 2016 - 2019.

Faena	Ítem/Año	2016	2017	2018	2019
Caserones	Consumo de agua (m ³ /día)	13.478	13.478	15.898	23.933
	Producción de Cu (t/año)	117.300	122.800	136.500	145.500
	Capacidad tratamiento lixiviación (t/día)	7.190	7.190	7.190	7.190
	Make up (m³/t)	0,094	0,094	0,111	0,166
	Capacidad tratamiento concentración (t/día)	92.039	92.039	92.039	92.039
	Make up (m³/t)	0,136	0,136	0,161	0,242

4.2.1.19. Carmen de Andacollo

Ubicación: Región de Coquimbo.

Tabla 4.23. *Make up* y producción de Cu Carmen de Andacollo periodo 2016 - 2019.

Faena	Ítem/Año	2016	2017	2018	2019
Carmen de Andacollo	Consumo de agua (m ³ /día)	30.931	36.979	30.672	26.957
	Producción de Cu (t/año)	73.200	76.000	67.200	54.000
	Capacidad tratamiento lixiviación (t/día)	10.000	10.000	10.000	10.000
	Make up (m³/t)	0,155	0,185	0,153	0,135
	Capacidad tratamiento concentración (t/día)	110.400	110.400	110.400	110.400
	Make up (m³/t)	0,261	0,312	0,258	0,227

4.2.1.20. Los Pelambres

Ubicación: Región de Coquimbo.

Tabla 4.24. *Make up* y producción de Cu Los Pelambres periodo 2016 - 2019.

Faena	Ítem/Año	2016	2017	2018	2019
Los Pelambres	Consumo de agua (m ³ /día)	66.701	70.762	69.638	52.557
	Producción de Cu (t/año)	367.800	356.300	370.500	375.900
	Capacidad tratamiento concentración (t/día)	175.000	175.000	175.000	175.000
	Make up (m³/t)	0,362	0,384	0,378	0,285

4.2.2. Macrozona Centro

4.2.2.1. El Soldado

Ubicación: Región de Valparaíso.

Tabla 4.25. *Make up* y producción de Cu El Soldado periodo 2016 - 2019.

Faena	Ítem/Año	2016	2017	2018	2019
El Soldado	Consumo de agua (m ³ /día)	11.664	18.835	8.899	11.923
	Producción de Cu (t/año)	-	-	-	54.190
	Capacidad tratamiento concentración (t/día)	22.500	22.500	22.500	22.500
	Make up (m³/t)	0,468	0,712	0,334	0,471

4.2.2.2. Andina

Ubicación: Región de Valparaíso.

Tabla 4.26. *Make up* y producción de Cu Andina periodo 2016 - 2019.

Faena	Ítem/Año	2016	2017	2018	2019
Andina	Consumo de agua (m ³ /día)	88.042	80.179	73.613	72.058
	Producción de Cu (t/año)	193.400	220.000	195.500	170.300
	Capacidad tratamiento concentración (t/día)	92.000	92.000	92.000	92.000
	Make up (m³/t)	0,863	0,742	0,675	0,696

4.2.2.3. Los Bronces

Ubicación: Región Metropolitana de Santiago.

Tabla 4.27. *Make up* y producción de Cu Los Bronces periodo 2016 - 2019.

Faena	Ítem/Año	2016	2017	2018	2019
Los Bronces	Consumo de agua (m ³ /día)	84.586	83.290	69.552	29.030
	Producción de Cu (t/año)	-	-	369.500	335.000
	Capacidad tratamiento concentración (t/día)	150.000	150.000	150.000	150.000
	Make up (m³/t)	0,509	0,473	0,391	0,172

4.2.2.4. El Teniente

Ubicación: Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Tabla 4.28. *Make up* y producción de Cu El Teniente periodo 2016 - 2019.

Faena	Ítem/Año	2016	2017	2018	2019
El Teniente	Consumo de agua (m ³ /día)	132.797	134.352	144.461	141.437
	Producción de Cu (t/año)	475.300	464.300	465.000	459.700
	Capacidad tratamiento concentración (t/día)	144.000	144.000	144.000	144.000
	Make up (m³/t)	0,832	0,794	0,847	0,872

La Figura 4.2. y 4.3. grafican las variaciones de *Make up* para el periodo 2016 - 2019 por tipo de procesamiento del mineral y agrupados según la clasificación de minerales de Arc propuesta para las faenas de Cu en estudio.

Para el procesamiento vía concentración (Figura 4.2.) se observa un comportamiento de *Make up* menor para aquellas faenas clasificadas con índice A. Mientras que las catalogadas con índice B y C evidencian valores más altos, pero sin patrones claros entre sí.

Para el procesamiento vía hidrometalurgia (Figura 4.3.) no se distinguen patrones claros y diferenciables entre los índices propuestos. El índice B alcanza los mayores valores en general para el periodo considerado.

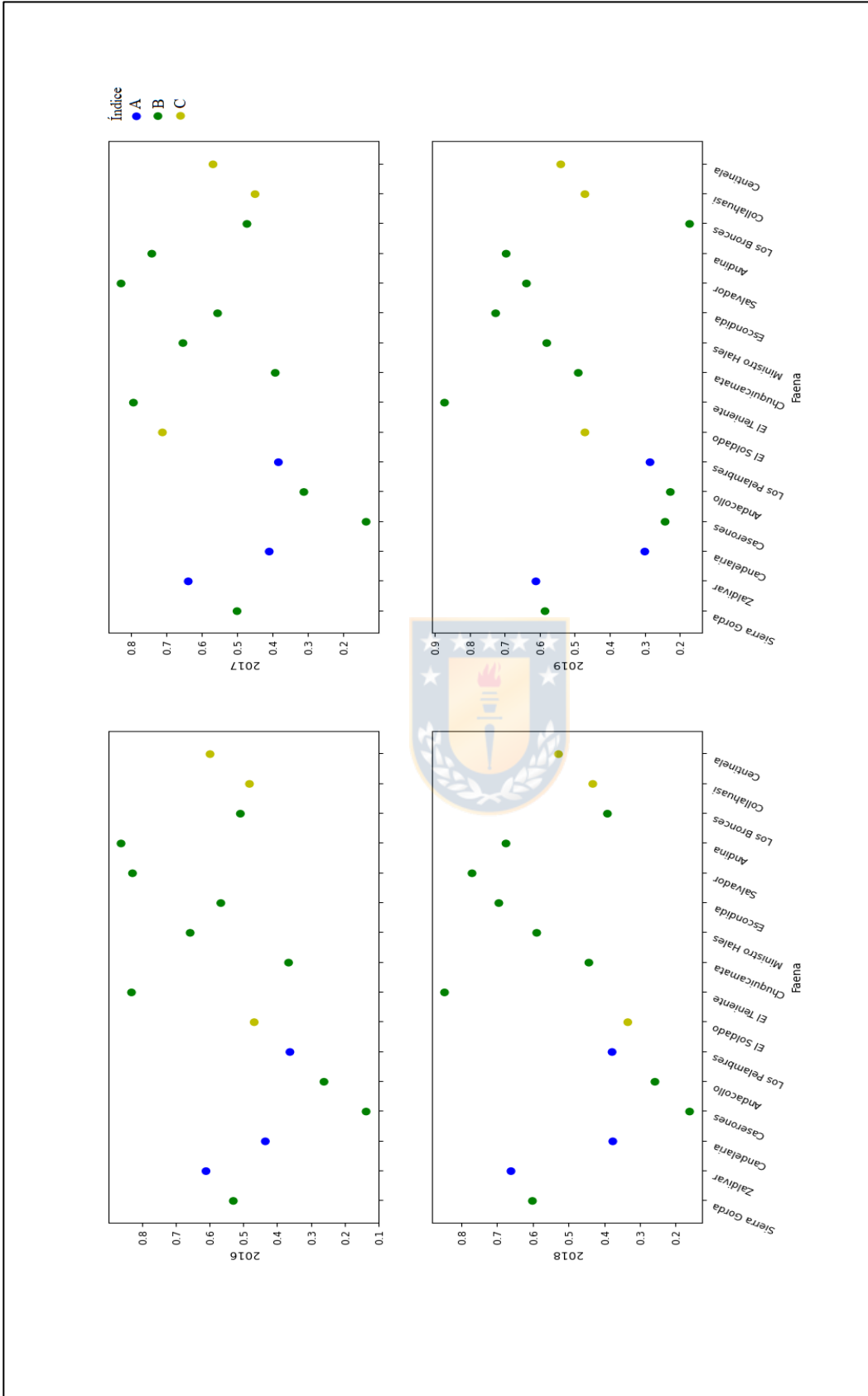


Figura 4.2. Make up concentración período 2016 - 2019. Elaboración propia.

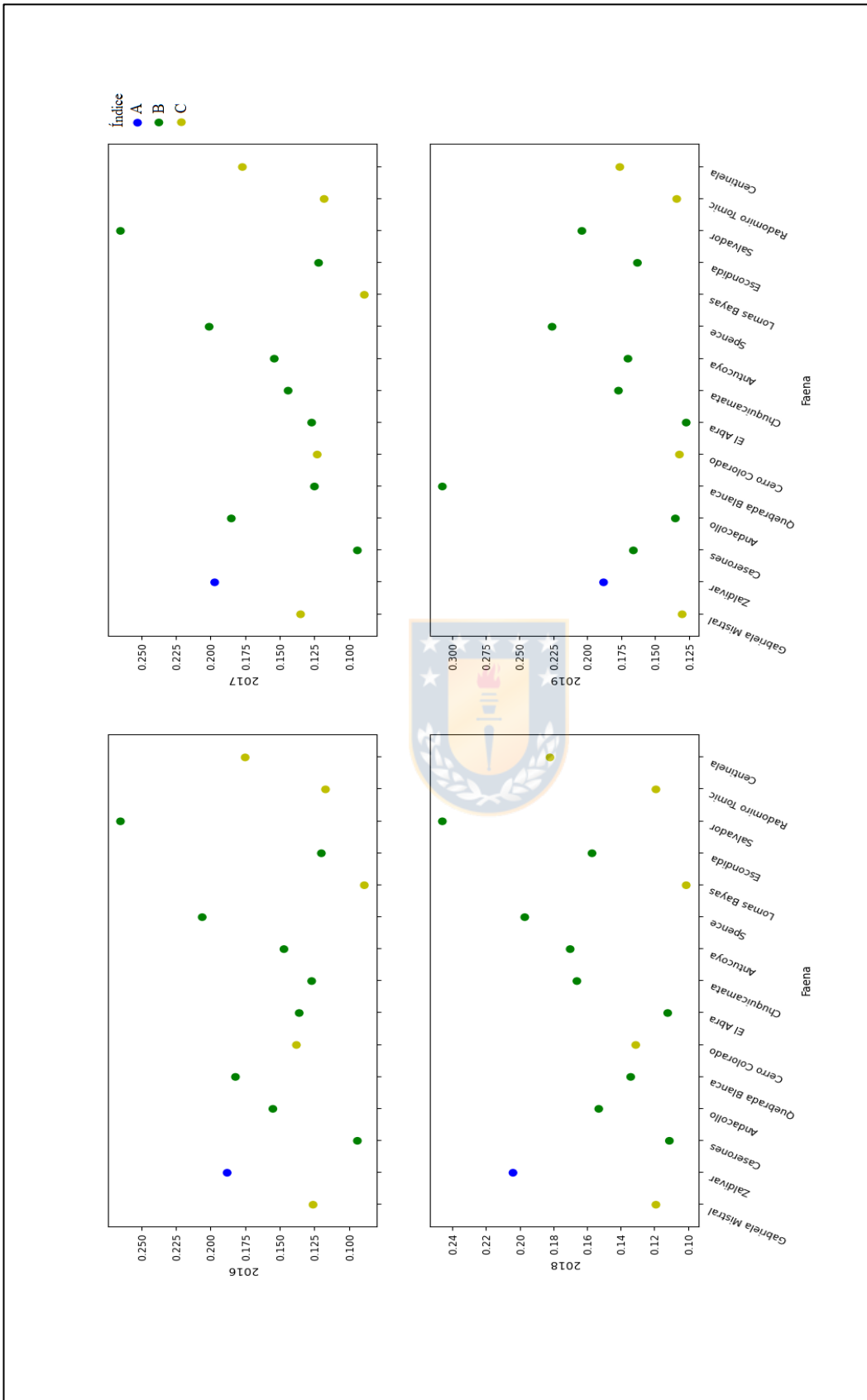


Figura 4.3. Make up hidrometalurgia período 2016 - 2019. Elaboración propia.

4.2. Proyección del Consumo de Agua Periodo 2020 - 2031

Para la estimación del consumo de agua se consideraron los siguientes parámetros:

- *Make up* del año 2019. Sin embargo, aquellos valores muy distantes de la tendencia del periodo o inexistencia se descartaron, optando por valores del año 2018 en las faenas Quebrada Blanca, Los Bronces y Lomas Bayas.
- En proyectos de explotación nuevos de sulfuros primarios mediante flotación, se utilizó el *Make up* promedio nacional, que corresponde a 0,520 (m³/t).
- Capacidad instalada de tratamiento por proceso para cada operación, adicionándole la presupuestada por la cartera de inversiones de cada empresa minera según tres escenarios posibles, la cual es recopilada y publicada por COCHILCO, 2019; 2020b; 2021a.
- Disminución de la producción vía hidrometalurgia en un 50% al 2031, que se evalúa proporcional al consumo de agua para esta técnica.

4.2.1. Escenario de proyección máxima

Se establece que todos los proyectos en cartera se llevarán a cabo en los plazos declarados. La Tabla 4.29. y 4.30. representan el consumo de agua proyectado para el periodo en estudio.

Tabla 4.29. Estimación del consumo de agua en un escenario máximo para el periodo 2020 - 2025.

Proceso/año	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Concentración (m ³ /día)	919.759	919.759	979.357	1.067.994	1.149.957	1.226.299
Concentración (m ³ /s)	10,645	10,645	11,335	12,361	13,310	14,193
Hidrometalurgia (m ³ /día)	178.472	178.472	181.536	181.590	182.721	182.721
Hidrometalurgia (m ³ /s)	2,066	2,066	2,101	2,102	2,115	2,115

Tabla 4.30. Estimación del consumo de agua en un escenario máximo para el periodo 2026 - 2031.

Proceso/año	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Concentración (m ³ /día)	1.334.579	1.334.579	1.412.579	1.412.579	1.412.579	1.412.579
Concentración (m ³ /s)	15,447	15,447	16,349	16,349	16,349	16,349
Hidrometalurgia (m ³ /día)	182.721	164.448	146.176	127.904	109.632	91.360
Hidrometalurgia (m ³ /s)	2,115	1,903	1,692	1,480	1,269	1,057

4.2.2. Escenario de proyección probable

Se estima, implícitamente, que un proyecto potencial en prefactibilidad tarda dos años en pasar a factibilidad, luego dos años a la categoría posible, luego otros tres años hasta probable y dos años de probable a base (COCHILCO, 2020c).

La Tabla 4.31. y 4.32. muestran el consumo de agua proyectado para el periodo en estudio.

Tabla 4.31. Estimación del consumo de agua en un escenario probable para el periodo 2020 - 2025.

Proceso/año	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Concentración (m ³ /día)	919.759	919.759	979.357	997.795	997.795	997.795
Concentración (m ³ /s)	10,645	10,645	11,335	11,549	11,549	11,549
Hidrometalurgia (m ³ /día)	178.472	178.472	181.536	181.590	181.590	181.590
Hidrometalurgia (m ³ /s)	2,066	2,066	2,101	2,102	2,102	2,102

Tabla 4.32. Estimación del consumo de agua en un escenario probable para el periodo 2026 - 2031.

Proceso/año	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Concentración (m ³ /día)	1.079.758	1.137.252	1.137.252	1.137.252	1.156.100	1.264.380
Concentración (m ³ /s)	12,497	13,163	13,163	13,163	13,381	14,634
Hidrometalurgia (m ³ /día)	181.590	163.431	145.272	127.904	109.632	91.360
Hidrometalurgia (m ³ /s)	2,102	1,892	1,681	1,480	1,269	1,057

4.2.3. Escenario de proyección mínima

Ningún proyecto se realizará en el plazo estipulado, por lo que el consumo de agua será constante.

La Tabla 4.33. y 4.34. exhiben el consumo de agua proyectado para el periodo en estudio.

Tabla 4.33. Estimación del consumo de agua en un escenario mínimo para el periodo 2020 - 2025.

Proceso/año	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Concentración (m ³ /día)	919.759	919.759	919.759	919.759	919.759	919.759
Concentración (m ³ /s)	10,645	10,645	10,645	10,645	10,645	10,645
Hidrometalurgia (m ³ /día)	178.472	178.472	178.472	178.472	178.472	178.472
Hidrometalurgia (m ³ /s)	2,066	2,066	2,066	2,066	2,066	2,066

Tabla 4.34. Estimación del consumo de agua en un escenario mínimo para el periodo 2026 - 2031.

Proceso/año	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Concentración (m ³ /día)	919.759	919.759	919.759	919.759	919.759	919.759
Concentración (m ³ /s)	10,645	10,645	10,645	10,645	10,645	10,645
Hidrometalurgia (m ³ /día)	178.472	160.625	142.778	124.930	107.083	89.236
Hidrometalurgia (m ³ /s)	2,066	1,859	1,653	1,446	1,239	1,033

Si consideramos una proyección para toda la minería del Cu, podemos establecer las siguientes relaciones para las otras faenas:

- La producción nacional del año 2019, contenida en la Tabla 4.35.

Tabla 4.35. Producción de Cu en el año 2019. COCHILCO, 2021b.

Faenas	Producción de Cu 2019 (t Cu/año)	Porcentaje (%)
Con datos disponibles (este estudio)	5.442.990	94
Otras	344.410	6
Total	5.787.400	100

- Ley de Cu promedio de un 0,6% para los minerales procesados por hidrometalurgia y un 0,65% por concentración.
- En base al desglose de producción por proceso durante los últimos años por COCHILCO, 2021b. Se estima que la concentración es superior en un factor 2,5 veces a la hidrometalurgia, obteniendo los valores de producción contenidos en la Tabla 4.36.

Tabla 4.36. Desglose de estimación de producción de otras faenas por proceso.

Proceso	Producción (t Cu/ año)
Concentración	246.007
Hidrometalurgia	98.403
Total	344.410

- *Make up* promedio de 0,15 para hidrometalurgia y 0,6 para concentración. Se estima que estos valores deben ser más altos que el promedio de la industria por un factor de escala y eficiencia del procesamiento de minerales.

De esta forma, se obtienen los consumos de agua por proceso para las otras faenas de Cu en Chile, en la Tabla 4.37.

Tabla 4.37. Estimación del consumo de agua de otras faenas de Cu y parámetros considerados.

Proceso/ ítem	Concentración	Hidrometalurgia
Ley promedio	0,65%	0,6%
Material a procesar por tonelada de Cu	153.846	166.667
Producción anual (t/año)	246.007	98.403
Material procesado (t/año)	37.847.253	16.400.476
Make up (m ³ /t)	0,60	0,15
Consumo de agua (m ³ /año)	22.708.352	2.460.071
Consumo de agua (m³/s)	0,720	0,078

La Figura 4.4. grafica los escenarios considerados para el proceso de concentración y la Figura 4.5. la comparación de proyección del consumo de agua en concentración entregada por COCHILCO, 2020c y el escenario probable total de este estudio.

La Figura 4.6. grafica los escenarios para la línea de hidrometalurgia y la Figura 4.7. contrasta las proyecciones para esta técnica de procesamiento.

Los escenarios totales consideran toda la producción de Cu en el país, mientras que los escenarios mínimo, probable y máximo a secas solamente las faenas de Cu en Chile con información disponible y recabada para este estudio.

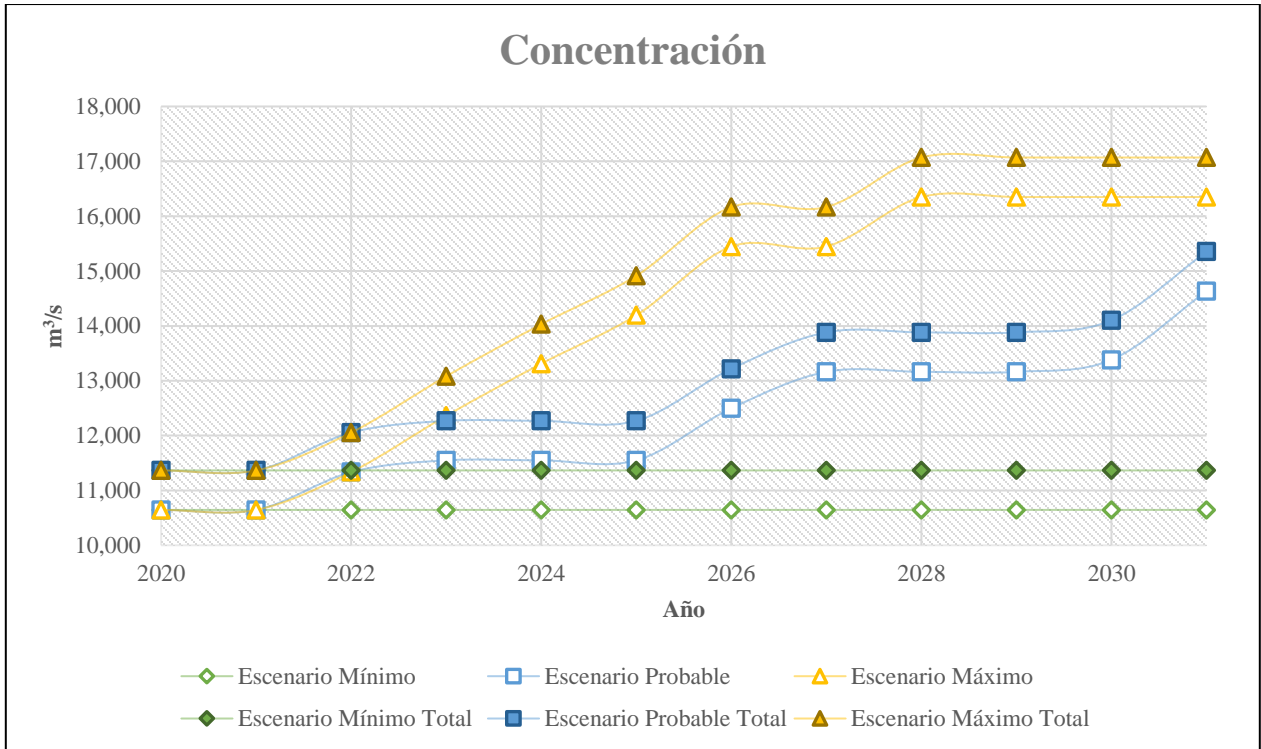


Figura 4.4. Gráfico de proyección del consumo de agua en concentración durante el periodo 2020 - 2031.

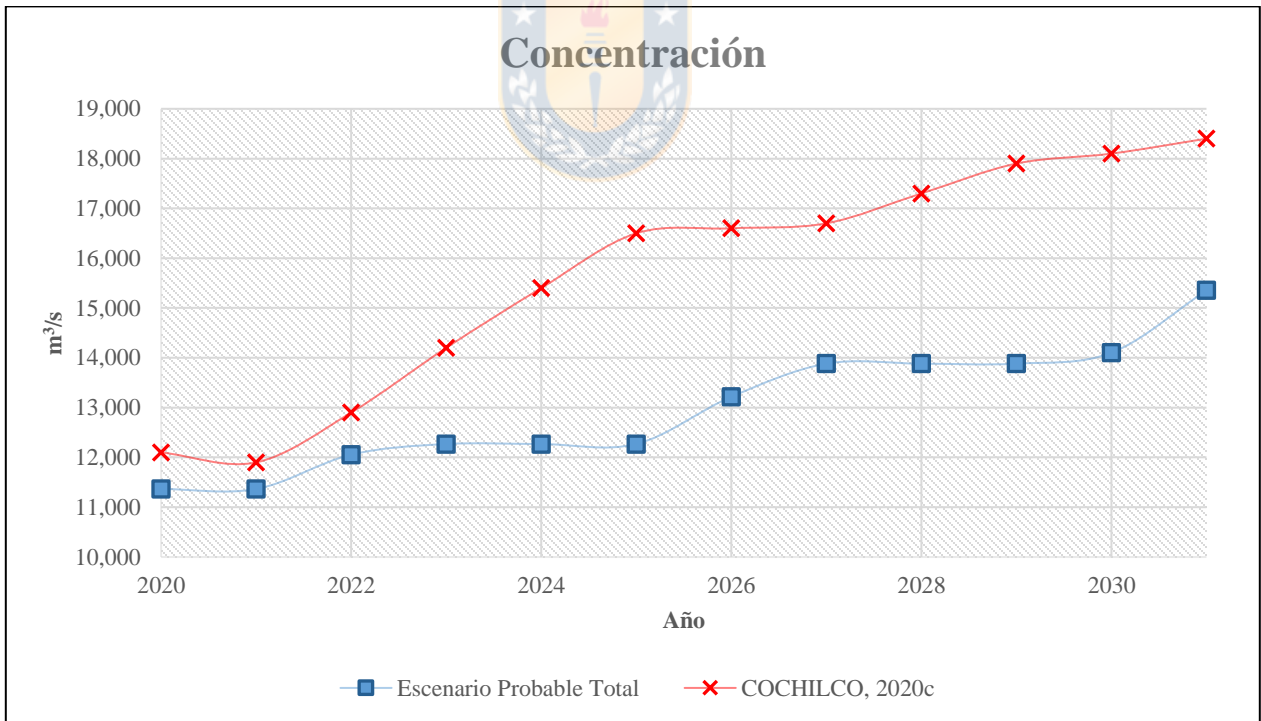


Figura 4.5. Gráfico comparación de proyecciones de consumo de agua en concentración. Escenario probable total y COCHILCO 2020c.

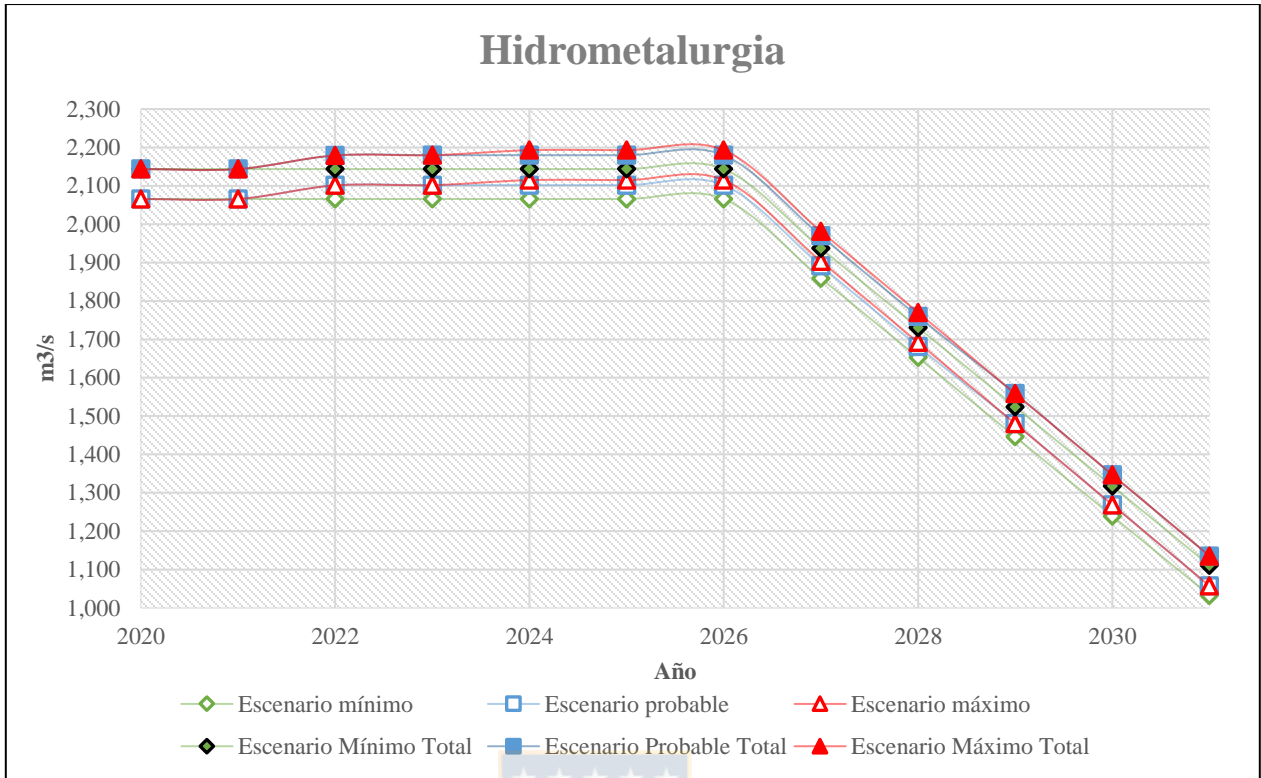


Figura 4.6. Gráfico de proyección del consumo de agua en hidrometalurgia durante el periodo 2020 - 2031.

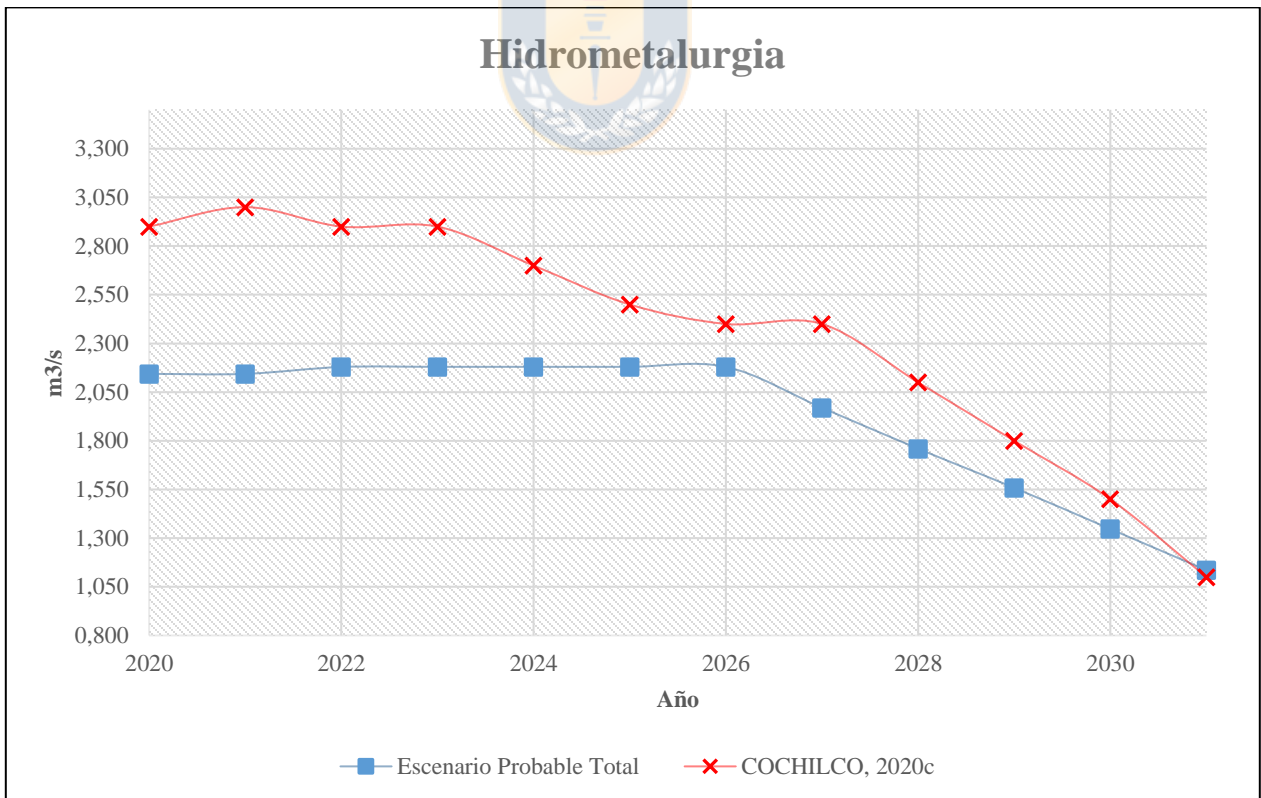


Figura 4.7. Gráfico comparación de proyecciones de consumo de agua en hidrometalurgia. Escenario probable total y COCHILCO 2020c.

5. DISCUSIÓN

5.1. Análisis Crítico de los Resultados

En primer lugar, es necesario mencionar la insuficiente e/o inexacta información disponible acerca del consumo de agua en la minería del Cu en Chile, el cual se redujo al análisis de solamente 24 faenas de las 48 pertenecientes a la gran minería de este metal según el anuario de la minería en Chile (SERNAGEOMIN, 2020a). Sin embargo, este grupo considerado constituye aproximadamente el 94% de la producción total de Cu en el país, por lo que es relevante y representativo para su estudio.

La inexactitud de los datos recae en la naturaleza de la información entregada por el Consejo Minero, la cual es entregada según la fuente y no en la cantidad de agua que se destina en la operación minera por proceso o uso dentro de la misma. Esto conlleva a suponer el porcentaje destinado para el procesamiento de minerales en las líneas de concentración e hidrometalurgia de acuerdo con las estadísticas proporcionadas por COCHILCO, 2020a. Este factor resulta en valores de *Make up* coherentes en general, pero que en ciertas faenas conduce a un grado de incertidumbre mayor. Estas corresponden a Spence, Centinela, Lomas Bayas, Zaldívar, Caserones, Salvador, Carmen de Andacollo y Los Pelambres.

La proyección del consumo de agua según los tres escenarios planteados resulta en valores congruentes. Sin embargo, debemos considerar que la estaticidad propuesta para los *Make up*, tasas de procesamiento de plantas y producción de Cu a lo largo de los años es poco probable.

Otro factor importante a considerar es el periodo acotado con información disponible, que sumado a la reducida población de faenas resulta en una cantidad de datos insuficiente para realizar un análisis estadístico predictivo más robusto.

5.2. Mineralogía de Arc

Considerando el marco geotectónico de la metalogénesis en Chile y los procesos involucrados en la génesis de los depósitos en estudio, donde prima la ocurrencia de mineralización asociada a un modelo de pórfido cuprífero, podemos afirmar que la mayoría pertenece a las franjas metalogénicas del Paleoceno - Eoceno inferior, Eoceno superior - Oligoceno inferior y del Neógeno. Sobre las dos primeras se desarrolló una época metalogénica supérgena que propicia la génesis de Arc que tienden a elevar el consumo de agua. La ocurrencia y distribución de estas fases minerales también pueden acentuarse por la presencia de estructuras mayores, tal como el Sistema

de Falla de Domeyko que controla y alberga la distribución de la franja del Eoceno superior al Oligoceno inferior. Mientras que los depósitos de la franja del Neógeno de Chile Central exhiben también un enriquecimiento supérgeno, de menor importancia, pero activo hasta la actualidad.

De acuerdo con el modelo de alteraciones de cada depósito en estudio, es esperable que el efecto de la mineralogía de Arc tienda a mantenerse y/o disminuir su impacto a corto y mediano plazo. Esto debido a que estos minerales están presentes en mayor medida en la alteración argílica y zona supérgena, las cuales se sitúan en la parte superficial a media de cada yacimiento.

5.3. Ley de Cu y Tasa de Recirculación de Agua

Respecto a la ley de Cu de los depósitos en Chile, podemos afirmar que sufren un “envejecimiento” o disminución de su ley en el tiempo. Esto debido a que las zonas de alteración hipógena en general tienden a contener menor proporción de Cu que una zona de enriquecimiento secundario o una zona de oxidados. Como también producto de factores operativos, en los cuales se prioriza naturalmente la explotación de volúmenes de roca con mayor ley.

La Tabla 5.1. indica la cantidad de material a procesar según su ley para obtener una tonelada de Cu fino. De estas relaciones se establece que evidentemente a menor ley de Cu es mayor la cantidad de material a tratar en las plantas, lo que conlleva una mayor tasa de consumo de agua y mayor probabilidad de lidiar con mineralogía de ganga perjudicial para el procesamiento, como el que constituyen los filosilicatos.

Tabla 5.1. Relación ley de Cu y toneladas de material a procesar por tonelada de Cu fino.

Ley de Cu (%)	Toneladas de material a procesar por tonelada de Cu fino
1	100 t
0,8	125 t
0,6	166,67 t
0,4	250 t

Las tasas de recirculación de agua resulta ser un indicador de especial consideración, ya que por sí mismo representa la eficiencia del proceso productivo en reciclar el agua. Factor que debería ir en aumento a lo largo de los años, debido principalmente a los avances de tecnología operacional y en mejores medidas de mitigación.

5.4. Demanda de Agua de Mar

Frente a la creciente demanda del agua en la industria minera, la cual opera en regiones con alto estrés hídrico, se ha propuesto e incentivado el uso de agua de mar directamente y desalinizada en los procesos productivos.

La Tabla 5.2. exhibe las operaciones de tratamiento de agua de mar hasta el año 2020.

Tabla 5.2. Plantas desaladoras y de impulsión de agua de mar para la minería en Chile. (1) Proveniente de la planta de Distrito Centinela. (2) EWS y Coloso corresponde a operación de impulsión de agua de mar. (3) Alcanza los 500 l/s de capacidad que tiene la planta actual. Acuerda vender a Aguas Chañar 170 l/s de agua desalinizada para disminuir la presión en el acuífero de Piedra colgada. Extraído de COCHILCO, 2020a.

Mina	Región	Capacidad de desalación (l/s)	Capacidad uso agua de mar (l/s)
Michilla	Antofagasta	75	23
Planta J.A. Moreno	Antofagasta	-	15
Las Cenizas Taltal	Antofagasta	9	12
Mantos de Luna	Antofagasta	20	5
Pampa Camarones	Arica y Parinacota	-	25
Distrito Centinela	Antofagasta	50	1500
CAP minería y otros clientes	Atacama	600	-
Escondida - Planta Coloso	Antofagasta	525	-
Antucoya	Antofagasta	20 ⁽¹⁾	280
Candelaria	Atacama	300	-
Mantoverde	Atacama	120	-
Sierra Gorda	Antofagasta	-	1315
Escondida EWS	Antofagasta	2500 ⁽²⁾	-
Candelaria 2030 - continuidad operacional	Atacama	Agrega 200 ⁽³⁾	-

La Tabla 5.3. contiene los proyectos de plantas desaladoras en cartera.

Tabla 5.3. Cartera de proyectos de plantas desaladoras y sistemas de impulsión de agua de mar en minería. (4) Proyectándose su uso como respaldo en períodos de sequía. (5) Aumento en la capacidad de la planta actual de 120 l/s a 380 l/s. (6) Agua desalada que se utilizará en caso de mantención o falla de las instalaciones de abastecimiento hídrico de uso permanente. El sistema de desalinización y conducción será habilitado en dos fases para suplir caudales máximos de 525 l/s y 1.050 l/s en el cuarto y octavo año del proyecto. (7) Nuevo acueducto paralelo y de reemplazo al existente. Extraído de COCHILCO, 2020a.

Año puesta en marcha	Mina	Región	Etapas de desarrollo	Capacidad de desalación (l/s)	Capacidad de uso agua de mar
2021	Proyecto de Infraestructura Complementaria (INCO)	Coquimbo	Construcción	400(4)	-
2024	Santo Domingo	Atacama	Factibilidad	30	400
2023	Diego de Almagro	Atacama	Factibilidad	-	315
2021	Spence Growth Option	Antofagasta	En construcción	800 (potencial de 1600)	-
2022	Desarrollo Mantoverde	Atacama	En construcción	Agrega 260(5)	-
2023	Quebrada Blanca hipógeno o QB2	Tarapacá	En construcción	850 (potencial de 1.200)	-
2023	Planta desaladora Distrito Norte CODELCO	Antofagasta	Factibilidad	840 (potencial de 1.956)	-
2024	Collahuasi	Tarapacá	Factibilidad	525 (potencial de 1.050) (6)	-

Continúa en la página 98

Continuación Tabla 5.3.

2025	Distrito minero Centinela	Antofagasta	Factibilidad	-	1650(7)
Sin información	Acueducto Distrito minero Centinela	Antofagasta	Factibilidad	-	850(7)
2027	Concentradora El Abra	Antofagasta	Sin EIA	500	-
2022	Energías y Aguas del Pacífico ENAPAC	Atacama	Aprobado y en factibilidad	2630	-
2028	NuevaUnión	Atacama	Factibilidad	700	-

De acuerdo con los datos declarados y recopilados por el Consejo Minero, la demanda de agua de mar y desalada representa el 25,9% en 2019, con un aumento de 9,5% respecto al 2016. Sumado a los nuevos proyectos en cartera, los cuales expandirán el uso de este tipo de aguas en faenas tales como: Spence, Quebrada Blanca, Distrito Norte de CODELCO, Collahuasi y El Abra. Totalizando una demanda futura probable por sobre el 40%.

El aumento previsible de este tipo de fuente de agua es un buen indicador en miras hacia un futuro sustentable y equilibrado en la zona de estudio con las debidas buenas prácticas.

5.5. Relaves

El avance en tecnologías de tratamiento de relaves permite mejoras sustanciales en la recuperación de agua en el proceso. Aumentando de esta forma las tasas de recirculación de este recurso. La Tabla 5.4. resume las características de cada tipo de relave.

Tabla 5.4. Tipos de relave según su tratamiento. Kiljunen, 2021, Diapositiva 4.

Tipo de relave	Sólidos secos	Make - up estimado (m ³ /t)	Ahorro de agua
Convencional	30 - 40%	0,8	-
Espesado	50 - 67%	0,6	-
En pasta	65 - 70%	0,4 - 0,5	30%
Filtrado	80 - 90%	0,25	70%

Respecto a la situación actual de relaves en Chile, SERNAGEOMIN, 2020b realiza un catastro de este tipo de depósitos. La Tabla 5.5. muestra los tipos de relave de las faenas en estudio.

Tabla 5.5. Extracto de catastro de relaves en Chile. SERNAGEOMIN, 2020b.

Faena	Comuna	Nombre instalación	Tipo instalación
Quebrada Blanca	Pica	QB2	Tranque de relave
Collahuasi	Pica	Pampa Pabellón	Embalse
Spence	Sierra Gorda	Spence	Tranque de relave
Zaldívar	Antofagasta	Embalse de relaves 3A	Embalse
Sierra Gorda	Sierra Gorda	Sierra Gorda	Espesado
Chuquicamata	Calama	Talabre	Tranque de relave

Continúa en la página 99

Continuación Tabla 5.5.

Esperanza (Centinela)	Sierra Gorda	Esperanza	Espesado
Escondida	Antofagasta	Laguna Seca	Embalse
Salvador	Diego de Almagro	Pampa Austral	Embalse
Salvador	Diego de Almagro	Convertidor Teniente	Filtrado
Candelaria	Copiapó	Corona	Tranque de relave
Candelaria	Tierra Amarilla	Candelaria	Tranque de relave
Candelaria	Tierra Amarilla	Los Diques	Espesado
Caserones	Tierra Amarilla	Arenas del Tambo	Tranque de relave
Caserones	Tierra Amarilla	Lamas La Brea	Embalse
Carmen de Andacollo	Andacollo	Hipógeno	Embalse
Los Pelambres	Salamanca	Los Quillayes	Tranque de relave
Los Pelambres	Los Vilos	El Mauro	Tranque de relave
El Soldado	Nogales	Torito	Tranque de relave
Andina	Los Andes	Los Leones	Embalse
Andina	Til Til	Ovejería	Tranque de relave
Andina	Los Andes	Piuquenes	Tranque de relave
Los Bronces	Colina	Las Tortolas	Tranque de relave
El Teniente	Alhue	Caren	Embalse

5.6. Propuesta Metodológica

Para poder cuantificar el impacto en el consumo de agua debido a la presencia de mineralogía de Arc en el procesamiento de minerales se proponen los siguientes pasos y/o aspectos a considerar:

En primer lugar, es necesario considerar el enfoque de la planificación de explotación de los recursos y/o reservas de un yacimiento en un periodo de largo o corto plazo. Una planificación de largo plazo se sustenta en un muestreo a través de campañas de sondajes, mientras que una planificación de corto plazo en el muestreo de pozos de tronadura o galerías subterráneas.

El muestreo debe ceñirse a la implementación de procedimientos adecuados de aseguramiento de la calidad y control de calidad (QA/QC) y en específico para la identificación de mineralogía de Arc a través de técnicas analíticas tales como: difracción de rayos X, técnicas hiperespectrales o microscopía electrónica automatizada QEMSCAN®.

Producto del muestreo sistemático en cualquiera de los enfoques anteriormente mencionados obtendremos una base de datos, la cual debe ser sujeta a un análisis exploratorio de datos (AED). Obteniendo estadísticas básicas tales como: media, máximo, mínimo, desviación estándar, varianza y análisis de distribución, correlación entre variables, análisis de componentes principales, entre otros.

Luego, se sugiere el uso de la geoestadística, en la cual nuestra variable regionalizada corresponde a él o los minerales de Arc identificados. Estas variables a su vez dependen de la

ocurrencia de algún dominio geológico (litología, alteración, entre otros) que corresponde a la variable categórica. Posteriormente, se realiza el análisis variográfico de la variable regionalizada en el espacio a través de la construcción del variograma experimental (Figura 5.1.). Esta herramienta nos indica la varianza de las muestras en función de la distancia entre estas, cuyo valor a cierta distancia tiende a cero entre muestras constituyendo el alcance y que gráficamente da lugar a una meseta (Figura 5.2.). La comparación de similitud o disimilitud del variograma en diferentes direcciones espaciales define la isotropía o anisotropía de la variable. Es importante destacar que para aplicar estas herramientas se debe verificar la estacionariedad de la variable regionalizada en el dominio considerado.

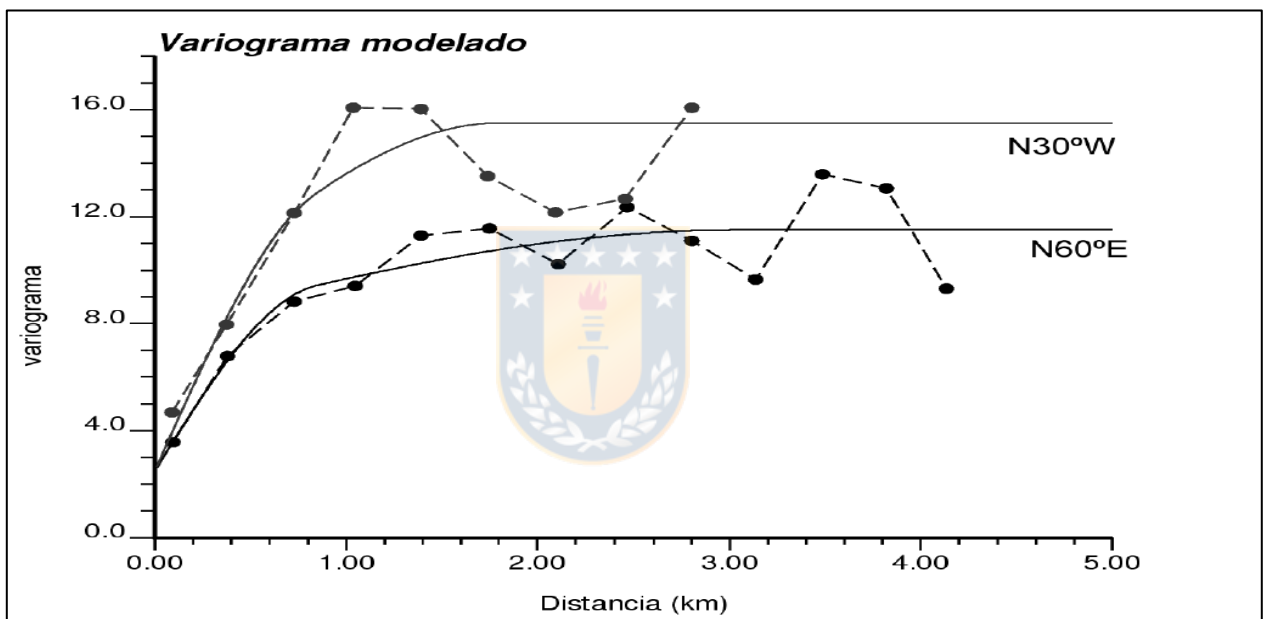


Figura 5.1. Variogramas experimentales en dos direcciones diferentes ajustados a variogramas modelados a efecto pepita y esférico. Extraído de Emery, 2013.

Con la obtención de la variografía experimental de la variable se procede a ajustarla a modelos de variograma, entre los cuales se distinguen: efecto pepita, esférico, exponencial, gaussiano, entre otros. Cabe destacar que comúnmente se procede a ajustar a un modelo anidado, que corresponde a la combinación de dos o más modelos.

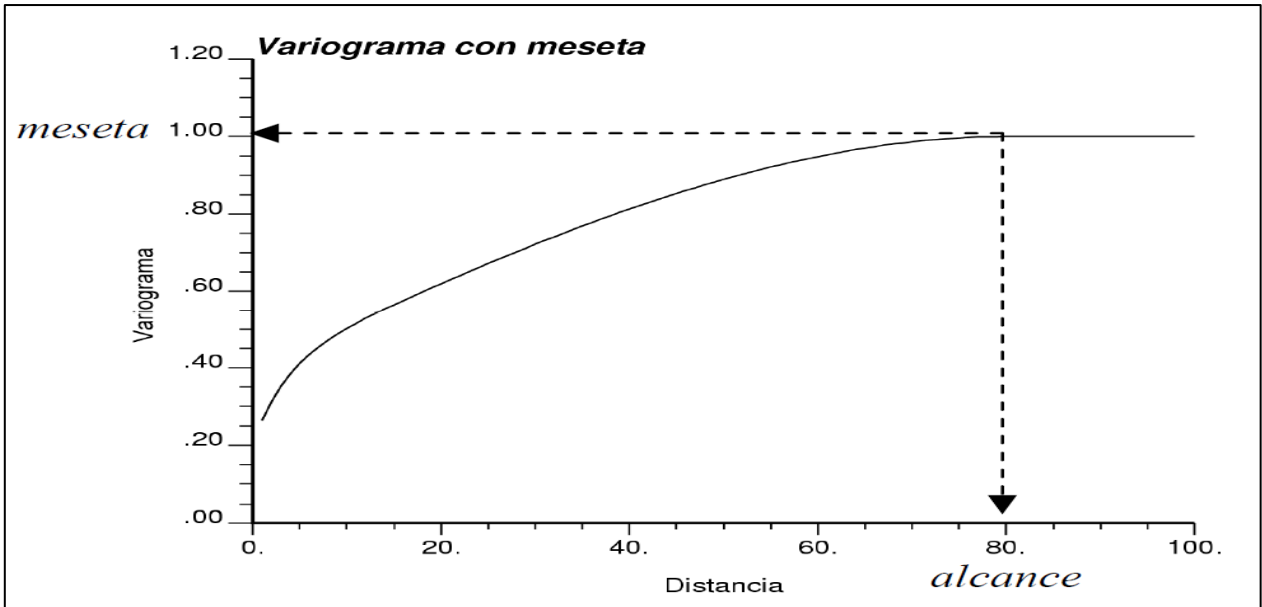


Figura 5.2. Variograma con meseta y alcance. Extraído de Emery, 2013.

Finalizada la etapa de variografía se continúa con la elaboración de modelos predictivos mediante *kriging*. Este estimador nos provee una interpolación exacta, insesgada, precisa y con suavizamiento. Además, se pueden construir simulaciones que consisten en construir una variable ficticia que reproduce la continuidad/variabilidad de la variable regionalizada, entregándonos una interpolación exacta, insesgada, sin suavizamiento pero que no es precisa (Emery, 2013).

Luego, estas estimaciones y/o simulaciones en conciliación a modelos de bloques de la variable Arc, leyes de Cu, parámetros geometalúrgicos, entre otras consideradas en el plan minero nos permitirá identificar que mineral de Arc entrará al proceso y en qué cantidad. En paralelo, se puede estudiar el comportamiento de la mineralogía mediante *test* geometalúrgicos en laboratorio, tales como lixiviación en columnas o simulaciones del proceso de concentración.

Finalmente, es necesaria la validación y retroalimentación del modelo mediante mediciones y resultados provenientes de la o las plantas de procesamiento de minerales.

La Figura 5.3. resume y representa el flujo de trabajo propuesto para determinar y medir la influencia de la mineralogía de arcillas en el procesamiento de minerales de Cu.

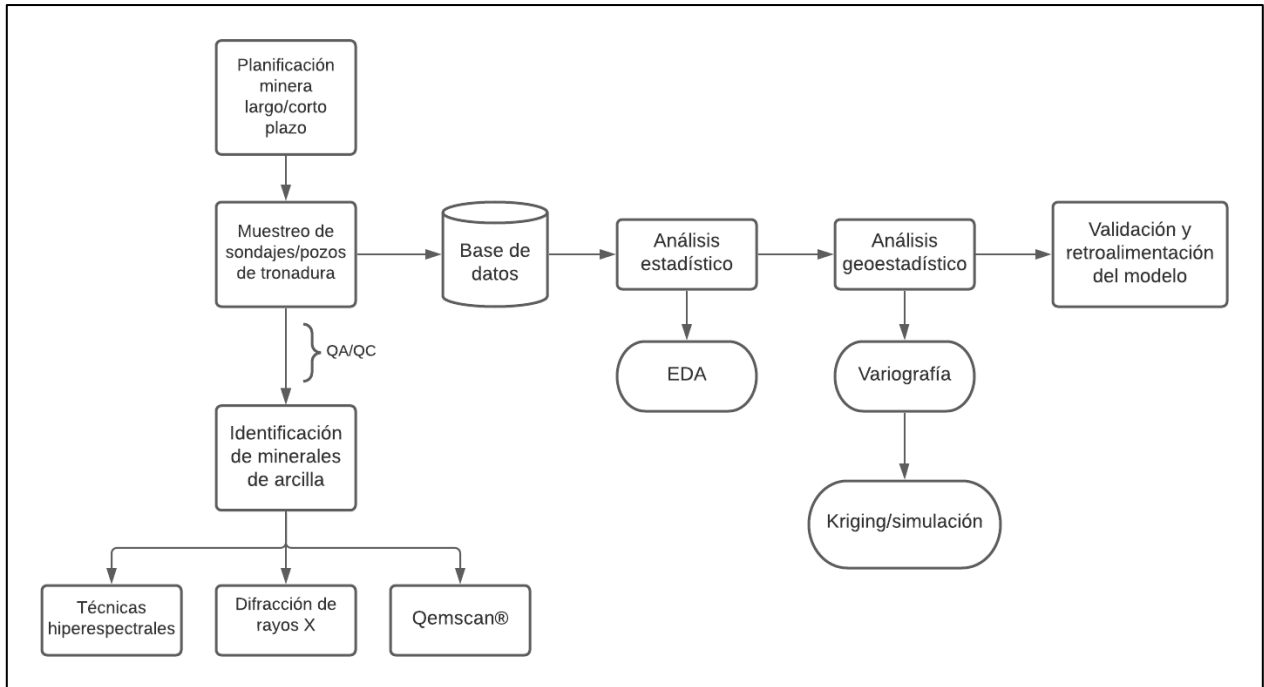


Figura 5.3. Flujo de trabajo de la metodología propuesta. Elaboración propia.



6. CONCLUSIONES

La recopilación de datos obtenidos para el cálculo del *Make up* periodo 2016 - 2019 constituyen información suficiente para obtener un comportamiento general de este parámetro. Sin embargo, el corto periodo de tiempo con información sumado al desconocimiento exacto del consumo de cada faena en cada línea de procesamiento resulta en valores con un grado de error no menor, pero consistentes en general.

La proyección del consumo de agua realizada para el periodo 2020 - 2031 es consecuente con la creciente demanda presente y futura de Cu a nivel mundial debido al avance tecnológico y a la dependencia cada vez mayor de la humanidad a esta en todo ámbito. Esto se ve reflejado en la abultada cartera de inversiones proyectada para el periodo, con aumento sustancial de las capacidades de procesamiento de minerales, que producto del agotamiento de los oxidados de Cu se tornará preferentemente al procesamiento vía concentración. Lo que implica inevitablemente el uso de mayor volumen de agua.

En concordancia con lo anterior, es esperable el “envejecimiento” de los yacimientos, dando paso a leyes de Cu cada vez más bajas, por lo que se procesará mayor cantidad de mineral para obtener 1 t de Cu fino, aumentando de esta forma la probabilidad de lidiar con mineralogía no deseada, como lo son las Arc.

Es destacable los esfuerzos de la minería del Cu por aminorar y gestionar el uso del recurso hídrico en la situación adversa presente y futura en este ámbito. Tales medidas constituyen las tasas de recirculación de aguas cada vez más eficientes, alcanzando valores por sobre el 70% y en metodologías de procesamiento y disposición de relaves.

El factor más prometedor para suplir la demanda de agua presente y futura corresponde al uso de agua de mar y desalada, el cual al final del periodo considerado cubrirá aproximadamente el 40% de la demanda total. Esto beneficiará significativamente la situación hídrica de aguas continentales en las macrozonas, mejorando su gestión y uso en otros ámbitos industriales y/o sociales.

Respecto a la metodología propuesta, la implementación de las técnicas analíticas de identificación de Arc y la aplicación de la geoestadística para elaborar modelos predictivos y simulaciones de la distribución de estas, y su posterior medición de consumo de agua en las líneas de procesamiento resulta desafiante. Por lo que se recomienda aplicar a escala de distrito, yacimiento o volumen representativo de este.

7. REFERENCIAS

- ABARZÚA, A. 2014. Zonación y Temporalidad Relativa de los Tipos de Alteración Hidrotermal en el Sector Los Bronces del Complejo Porfídico Cu-Mo Río Blanco-Los Bronces, Región Metropolitana, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 212 pp., Santiago.
- ADRIAZOLA, J. 2021 Modelo Tridimensional de Unidades de Mineralización del Yacimiento Antucoya. Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 157 pp., Concepción.
- AGUILAR, J. 2008. Caracterización Geotécnica y Estructural de la Rampa de Exploración y del Túnel de Drenaje, Mina Chuquicamata. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 134 pp., Santiago.
- AMBRUS, J. 1977. Geology of the El Abra porphyry copper deposit, Chile. *Economic Geology*, Vol. **72**(6): 1062-1085.
- ARCADIS GEOTÉCNICA. 2008. Proyecto Caserones, Geología del Proyecto, Apoyo EIA. Capítulo V - Línea de Base, Anexo V-1 Geología: 58 pp., Santiago.
- BARRIOS, M. 2015. Modelo Estructural y Cinemático del Yacimiento de Quebrada Blanca y su Relación con la Mineralización Supérgena. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 113 pp., Santiago.
- BECERRA, H.; DÍAZ, J. & HERRERA, R. 2009. Patrones estructurales asociados al Pórfido Cuprífero MMH. Congreso Geológico Chileno N°12. Actas **S11_005**: 1-4. Santiago.
- BISSO, C.; LAZCANO, E.; GUZMÁN, J. & GONZÁLEZ, S. 2009. Geología y desarrollo del Yacimiento Esperanza, Distrito Centinela, Antofagasta. Congreso Geológico Chileno N°12. Actas **S11_029**: 1-4. Santiago.
- BORIC, R.; DIAZ, J.; BECERRA, H. & ZENTILLI, M. 2009. Geology of the Ministro Hales Mine (MMH), Chuquicamata District, Chile. Congreso Geológico Chileno N°12. Actas **S11_055**: 1-4. Santiago.
- BOUZARI, F. & CLARK, A. 2002. Anatomy, eVolution, and metallogenic significance of the supergene orebody of the Cerro Colorado porphyry copper deposit, I Región, northern Chile. *Economic Geology*. Vol. **97**(8): 1701-1740.
- BOUZARI, F. & CLARK, A. 2006. Prograde eVolution and geothermal affinities of a major porphyry copper deposit: the Cerro Colorado hypogene protore, I Región, northern Chile. *Economic Geology*. Vol. **101**(1): 95-134.
- CABRERA, J. 2011. Caracterización Petrográfica y Petroológica de los Pórfidos Alimentadores del Yacimiento de la Mina Radomiro Tomic. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 183 pp., Concepción.
- CAMUS, F. 2001. Geología del Yacimiento Gaby Sur. In Congreso Internacional de Prospectores y Exploradores, ProExplo2001 N°2 (CD-ROM). Lima, Perú.
- CAMUS, F. 2003. Geología de los sistemas porfíricos en los Andes de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago.
- CAVIERES, M. 1975. Recopilación de antecedentes geológicos y mineros sobre algunos yacimientos y prospectos de tipo Cu porfídico en Chile. Prospectos Mocha, Quebrada Blanca; Yacimientos El Abra, Potrerillos, Andacollo, Los Pelambres.

- CEJAS, J. 2018. Efecto de la ley del mineral en el consumo de energía y agua, y las emisiones GEI en la minería del Cu. Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias de la ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de ingeniería (Inédito): 73 pp., Santiago.
- COCHILCO. 2019. Inversión en la minería chilena - Cartera de proyectos 2019 - 2028. DEPP 11/2019. Comisión Chilena del Cu. Santiago
- COCHILCO. 2020a. Consumo de agua en la minería del Cu al 2019. DEPP 14/2020. Comisión Chilena del Cu. Santiago.
- COCHILCO. 2020b. Inversión en la minería chilena - Cartera de proyectos 2020 -2029. DEPP 11/2020. Comisión Chilena del Cu. Santiago.
- COCHILCO. 2020c. Proyección de consumo de agua en la minería del Cu 2020 - 2031. DEPP 27/2020. Comisión Chilena del Cu. Santiago.
- COCHILCO. 2021a. Inversión en la minería chilena - Cartera de proyectos 2021 - 2030. DEPP 12/2021. Comisión Chilena del Cu. Santiago.
- COCHILCO. 2021b. Producción Cu de mina por empresa, frecuencia anual. Comisión Chilena del Cu. Santiago. Recuperado de <https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Bases%20de%20Datos/Producción-Minera.aspx>
- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región de Antofagasta 2016. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/03/agua-IIR-2016.pdf>
- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región de Antofagasta 2017. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/12/agua-IIR-2017.pdf>
- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región de Antofagasta 2018. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/12/agua-IIR-2018.pdf>
- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región de Antofagasta 2019. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/12/agua-IIR-2019.pdf>
- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región de Atacama 2016. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/07/agua-IIIR-2016.pdf>
- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región de Atacama 2017. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/03/agua-IIIR-2017.pdf>
- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región de Atacama 2018. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/12/agua-IIIR-2018.pdf>
- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región de Atacama 2019. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/12/agua-IIIR-2019.pdf>
- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región de Coquimbo 2016. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/03/agua-IVR-2016.pdf>
- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región de Coquimbo 2017. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/03/agua-IVR-2017.pdf>

- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región de Coquimbo 2018. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/12/agua-IVR-2018.pdf>
- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región de Coquimbo 2019. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/12/agua-IVR-2019.pdf>
- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región Metropolitana 2016. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/03/agua-RM-2016.pdf>
- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región Metropolitana 2017. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/03/agua-RM-2017.pdf>
- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región Metropolitana 2018. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/12/agua-RM-2018.pdf>
- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región Metropolitana 2019. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/12/agua-RM-2019.pdf>
- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región de O'Higgins 2016. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/03/agua-VIR-2016.pdf>
- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región de O'Higgins 2017. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/03/agua-VIR-2017.pdf>
- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región de O'Higgins 2018. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/12/agua-VIR-2018.pdf>
- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región de O'Higgins 2019. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/12/agua-VIR-2019.pdf>
- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región de Tarapacá 2016. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/07/agua-IR-2016.pdf>
- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región de Tarapacá 2017. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/02/agua-IR-2017.pdf>
- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región de Tarapacá 2018. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/12/agua-IR-2018.pdf>
- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región de Tarapacá 2019. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/12/agua-IR-2019.pdf>
- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región de Valparaíso 2016. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/03/agua-VR-2016.pdf>

- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región de Valparaíso 2017. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/03/agua-VR-2017.pdf>
- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región de Valparaíso 2018. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/12/agua-VR-2018.pdf>
- CONSEJO MINERO. 2021. Extracción de agua de empresas asociadas al Consejo Minero, Región de Valparaíso 2019. Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/12/agua-VR-2019.pdf>
- DEER, W.A.; HOWIE, R. & ZUSSMAN, J. 1992. An Introduction to Rock Forming Minerals. Longman Scientific & Technical: 495 pp. Essex.
- DÍAZ, J.; BORIC, R. & RIQUELME, R. 2009. Geología de los Sulfuros de Radomiro Tomic (RT), Nuevos Antecedentes. Congreso Geológico Chileno N°12. Actas **S11_010**: 1-4. Santiago.
- DÍAZ, J. 2010. Actualización de la Geología del Depósito Mina Ministro Hales (MMH). *Dirección Geología Distrital y Desarrollo. CODELCO Norte*, Informe Interno (Inédito).
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA). 2015. Atlas del Agua, Chile 2016. Ministerio de Obras Públicas: 142 pp. Santiago.
- EGGLESTON, T.; ROBERT, S.; ROBERT, C. & BLOWER, S. 2005. Technical Report on the Regalito Cu Property Region III, Northern Chile. AMEC: 30 pp.
- EMERY, X. 2013. Geoestadística. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Ingeniería de Minas (Inédito): 142 pp., Santiago.
- EVANS, L. & LAMBERT, R. 2012. Technical Report on the Zaldívar Mine, Region II, Chile. Roscoe Postle Associates Inc (RPA). NI 43-101 Report.
- FERNÁNDEZ-MORT, A.; RIQUELME, R.; ALONSO-ZARZA, A.; CAMPOS, E.; BISSIG, T.; MPODOZIS, C.; ... & MUÑOZ, S. 2018. A genetic model based on evapoconcentration for sediment-hosted exotic-Cu mineralization in arid environments: the case of the El Tesoro Central copper deposit, Atacama Desert, Chile. *Mineralium Deposita*. Vol. **53**(6): 775-795.
- FONTEALBA, R. 2017. Caracterización Geometalúrgica del Yacimiento Radomiro Tomic entre los Años 2017-2024, Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 230 pp., Concepción.
- FRIKKEN, P. 2003. Breccia-hosted copper-molybdenum mineralisation at Rio Blanco, Chile. PhD Thesis. University of Tasmania (Inédito): 312 pp., Australia.
- GESTIÓN AMBIENTAL CONSULTORES (GAC). 2018. Capítulo 1, Descripción de Proyecto. Estudio de Impacto Ambiental, Proyecto Rajo Inca: 235 pp.
- GARZA, R.; TITLEY, S. & PIMENTEL, B. 2001. Geology of the Escondida porphyry copper deposit, Antofagasta region, Chile. *Economic Geology*. Vol. **96**(2): 307-324.
- GONZÁLEZ, G. & CARRIZO, D. 2003. Segmentación, cinemática y cronología relativa de la deformación tardía de la Falla Salar del Carmen, Sistema de Fallas de Atacama, (23°40'S), norte de Chile. *Revista geológica de Chile*, Vol. **30**(2):223-244. Santiago.
- GRIFFITH, T. 2006. Report on Mineral Resource and Mineral Reserve Estimates at Carmen de Andacollo Copper Mine, Region IV, Chile.
- GUSTAFSON, L.; ORQUERA, W.; McWILLIAMS, M.; CASTRO, M.; OLIVARES, O.; ROJAS, G. ... & MENDEZ, M. 2001. Multiple centers of mineralization in the Indio Muerto district, El Salvador, Chile. *Economic Geology*. Vol. **96**(2): 325-350.

- HERVÉ, M.; SILLITOE, R.; WONG, C.; FERNÁNDEZ, P.; CRIGNOLA, F.; IPINZA, M.; & URZÚA, F. 2012. Geologic overview of the Escondida porphyry copper district, northern Chile. *Society of Economic Geologist*. Special Publication. Vol. **16**: 55-78.
- HOFMANN, A. 2012. Comportamiento de la Mineralogía de Ganga en el Proceso Hidrometalúrgico en Mina Cerro Colorado. Tesis para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 77 pp., Santiago.
- IRELAND, T. 2010. Geological framework of the mineral deposits of the Collahuasi district, Región de Tarapacá, Chile. PhD thesis, University of Tasmania (Inédito): 414 pp., Hobart.
- Kiljunen, P. 2021. Manejo Sostenible de Relaves Mineros y Reúso del Agua [Diapositiva 4]. Webinar Internacional CRHIAM 2021: Reúso de Agua en Minería. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=-mfWllX-Qkw>.
- LUCKHAM, P. & ROSSI, S. 1999. The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions. *Advances in Colloid and Interface Science*. Vol. **82**: 43-92.
- LUMINA COPPER, 2015. Desarrollo y Experiencias del Proyecto Caserones. DocPlayer. <https://docplayer.es/55568728-Desarrollo-y-experiencias-del-proyecto-caserones-scm-minera-lumina-copper-chile.html>
- LLAUMETT, C.; OLCAY, L.; MARÍN, C.; MARQUARDT, J. & REYES, E. 1975. El Yacimiento Cu Porfídico “Andacollo”, Provincia de Coquimbo, Chile. *Andean Geology*. Vol. **2**: 1-11.
- MAKSAEV, V. 2001. Reseña Metalogénica de Chile y de los Procesos que Determinan la Metalogénesis Andina. Metalogénesis, Semestre de Primavera 2001. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 63 pp. Santiago
- MARSHIK, R. & FONTBOTÉ, L. 2001. The Candelaria-Punta del Cu iron oxide Cu-Au(-Zn-Ag) deposits, Chile. *Economic Geology*. Vol. **96**: 1799-1826.
- MASTERMAN, G.; COOKE, D.; BERRY, R.; CLARK, A.; ARCHIBALD, D.; MATHUR, R. ... & DURÁN, M. 2004. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Re-Os geochronology of porphyry copper-molybdenum deposits and related copper-silver veins in the Collahuasi district, northern Chile. *Economic Geology*, Vol. **99**(4): 673-690.
- MORAGA, A. 2000. Un modelo mineralógico en el yacimiento El Abra, tipo pórfido cuprífero. Congreso Geológico Chileno N° 9. Actas Vol. **1**(2): 298-302. Puerto Varas.
- MORALES, F. 2017. Estudio del Efecto de las Interacciones del Sistema “Agua de Mar - Cal” en Procesamiento de Minerales. Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Metalurgia Extractiva. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas (Inédito): 122 pp., Santiago.
- MORENO, L.; SANHUEZA, A.; FAJARDO, J.; GUZMÁN, R.; LAGOS, M.; NAVA, M.; ... & RUGGIERO, A. 2012. Mineralización Hipógena del Pórfido Paleoceno Spence. Congreso Geológico Chileno N°13. Actas **1**: 31-33. Antofagasta.
- NDLOVU, B.; BECKER, M.; FORBES, E.; DEGLON, D. & FRANZIDIS, J. 2011. The influence of phyllosilicate mineralogy on the rheology of mineral suspensions. *Minerals Engineering*. Vol. **24**: 1314 - 1322.
- NDLOVU, B.; FORBES, E.; FARROKHPAY, S.; BECKER, M.; BRADSHAW, D. & DEGLON, D. 2014. A preliminary rheological classification of phyllosilicate group minerals. *Minerals Engineering*. Vol. **55**: 190-200.
- OSSANDÓN, G.; FRÉRAUT, R.; GUSTAFSON, B.; LINDSAY, D. & ZENTILLI, M. 2001. Geology of the Chuquicamata mine: A progress report. *Economic Geology*. Vol. **96**(2), 249-270.
- PARRA, A.; ZAMARREÑO, J.; HERRERA, P.; CARRASCO, M. & CABRERA, J. 2010. Actualización de la Geología del Yacimiento Radomiro Tomic y su relación con

- Chuquicamata. *Jornadas de Geociencias, CODELCO Norte*. Primera Reunión Bi-anual Geociencias 2010. Subgerencia de Geología y Geotécnica, Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo: 23-37. Calama.
- PERELLÓ, J.; BROCKWAY, H.; & MARTINI, R. 2004. Discovery and geology of the Esperanza Cu-Au deposit, Antofagasta region, Northern Chile. *Society of Economic Geologists*. Special Publication **11**: 167-186.
- PHELPS DODGE CORP. 2004. The Candelaria deposit and the Coastal IOCG Belt, Chile. 2004 presentation.
- QUADRA MINING Ltda. 2009. Scoping study for the Sierra Gorda Project, Región II, Chile. Antofagasta.
- RABAJILLE, F. 2010. Estudio Mineralógico de Procesos Supérgenos en el Yacimiento Spence, Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito). Santiago.
- RIVERA, L.; ALCOTA, H.; PROFFETT, J.; DÍAZ, J.; LEIVA, G. & VERGARA, M. 2012. Update of the geologic setting and porphyry Cu-Mo deposits of the Chuquicamata district, northern Chile. *Economic Geology*. Special publication **16**: 19-54.
- SAAVEDRA, F. 2019. Modelamiento Implícito de Resistencia de Roca en Minera Los Pelambres Mediante Estimación por Inverso a la Distancia y Kriging Ordinario. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 136 pp., Concepción.
- SCHULZ, C. 2020. Química Mineral de las Cloritas Hidrotermales del Yacimiento El Teniente, Chile Central. “Implicancias en la Exploración de Pórfidos de Cu”. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 161 pp., Concepción.
- SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA (SERNAGEOMIN). 2020a. Anuario de la Minería de Chile 2019. Servicio Nacional de Geología y Minería: 283 pp., Santiago.
- SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA (SERNAGEOMIN). 2020b. Catastro de Depósitos de Relaves en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago. Recuperado de <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>
- SILLITOE, R.; MARQUARDT, J.; RAMÍREZ, F.; BECERRA, H. & GÓMEZ, M. 1996. Geology of the concealed MM porphyry copper deposit, Chuquicamata District, Northern Chile. *Society of Economic Geologists*. Special paper N° **5**: 59-70.
- SPENCER, E. 2015. The Transport and Deposition of Molybdenum in Porphyry Ore Systems. PhD thesis. Department of Earth Science and Engineering Imperial College London (Inédito): 318 pp.
- SPIESS, F. 2017. Distribución y Ocurrencia de Mercurio en el Yacimiento de Tipo Pórfido Cu-Molibdeno Río Blanco, Región de Valparaíso, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 96 pp., Santiago.
- URRUTIA, N. 2016. Estudio reológico de relaves basado en técnicas de caracterización avanzada de minerales. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas, Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Metalurgia Extractiva. Universidad de Chile, Departamento de ingeniería de Minas (Inédito): 199 pp., Santiago.
- VEGA, D.; OLIVARES, J. & GONZÁLEZ, J. 2009. Esquema de Eventos Geológicos del Yacimiento Lomas Bayas. Congreso Geológico Chileno N°12. Actas **S11_061**: 1-4. Santiago.

- VEGA, D.; DIAZ, J. & MAREY, A. 2015. Esquema de Eventos Geológicos del Yacimiento Fortuna de Cu, Distrito Lomas Bayas, Región de Antofagasta. Congreso Geológico Chileno N°14. Actas **ST 5**: 1-4. La Serena.
- VILLAGRÁN, C. 2019. Modelamiento Implícito de Unidades Geotécnicas Básicas de Mina Ministro Hales, Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al Título de Geóloga. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 129 pp., Concepción.
- VIVANCO, L. 2020. Modelo Geológico de la Ocurrencia y Distribución Espacial del Molibdeno en el Yacimiento Rosario, Región de Tarapacá, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 190 pp., Santiago.
- WILSON, N.; & ZENTILLI, M. 1999. The role of organic matter in the genesis of the El Soldado Volcanic-hosted manto-type Cu deposit, Chile. *Economic Geology*. Vol. **94**(7): 1115-1135.
- WILSON, N.; ZENTILLI, M. & SPIRO, B. 2003. A sulfur, carbon, oxygen, and strontium isotope study of the Volcanic-hosted El Soldado manto-type copper deposit, Chile: the essential role of bacteria and petroleum. *Economic Geology*, Vol. **98**(1): 163-174.



ANEXO



INDICE DE ANEXOS

Anexo	Página
A	113
B	121
C	123
D	124



Anexo A

Tabla A.1. Extracción de agua por fuente Quebrada Blanca. Consejo Minero, 2021.

Faena	Fuente	2016	2017	2018	2019
Quebrada Blanca	Superficial (m ³ /s)	0,015	-	-	-
	Subterránea (m ³ /s)	0,052	0,050	0,053	0,120
	Mina (m ³ /s)	0,003	0,001	0,002	0,0002
	Mar No Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Terceros (m ³ /s)	-	-	-	-
	Total (m ³ /s)	0,070	0,051	0,055	0,120
	Total (m ³ /día)	6.048,000	4.406,400	4.752,000	10.385,280

Tabla A.2. Extracción de agua por fuente Cerro Colorado. Consejo Minero, 2021.

Faena	Fuente	2016	2017	2018	2019
Cerro Colorado	Superficial (m ³ /s)	-	-	-	-
	Subterránea (m ³ /s)	0,109	0,114	0,128	0,120
	Mina (m ³ /s)	0,018	0,006	0,001	0,003
	Mar No Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Terceros (m ³ /s)	-	-	-	-
	Total (m ³ /s)	0,127	0,120	0,129	0,123
	Total (m ³ /día)	10.972,800	10.368,000	11.145,600	10.627,200

Tabla A.3. Extracción de agua por fuente Collahuasi. Consejo Minero, 2021.

Faena	Fuente	2016	2017	2018	2019
Collahuasi	Superficial (m ³ /s)	-	-	-	-
	Subterránea (m ³ /s)	0,843	0,845	0,814	0,834
	Mina (m ³ /s)	0,170	0,163	0,158	0,181
	Mar No Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Terceros (m ³ /s)	0,084	0,077	0,079	0,074
	Total (m ³ /s)	1,097	1,085	1,051	1,089
	Total (m ³ /día)	94.780,800	93.744,000	90.806,400	94.089,600

Tabla A.4. Extracción de agua por fuente El Abra. Consejo Minero, 2021.

Faena	Fuente	2016	2017	2018	2019
El Abra	Superficial (m ³ /s)	-	0,211	-	-
	Subterránea (m ³ /s)	0,211	-	0,187	0,203
	Mina (m ³ /s)	0,009	0,007	0,006	0,006
	Mar No Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Terceros (m ³ /s)	-	-	0,000	0,000
	Total (m ³ /s)	0,220	0,218	0,193	0,209
	Total (m ³ /día)	19008,000	18835,200	16676,064	18066,240

Tabla A.5. Extracción de agua por fuente Radomiro Tomic. Consejo Minero, 2021.

Faena	Fuente	2016	2017	2018	2019
Radomiro Tomic	Superficial (m ³ /s)	0,040	0,040	0,037	-
	Subterránea (m ³ /s)	0,231	0,249	0,238	-
	Mina (m ³ /s)	-	-	0,001	0,0005
	Mar No Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Terceros (m ³ /s)	-	-	0,018	0,315
	Total (m ³ /s)	0,271	0,289	0,294	0,316
	Total (m ³ /día)	23.414,400	24.969,600	25.401,600	27.259,200

Tabla A.6. Extracción de agua por fuente Chuquicamata. Consejo Minero, 2021.

Faena	Fuente	2016	2017	2018	2019
Chuquicamata	Superficial (m ³ /s)	0,580	0,564	0,607	0,610
	Subterránea (m ³ /s)	0,744	0,828	1,200	1,155
	Mina (m ³ /s)	0,005	0,069	0,011	0,007
	Mar No Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Terceros (m ³ /s)	0,022	0,074	0,099	0,225
	Total (m ³ /s)	1,351	1,535	1,917	1,997
	Total (m ³ /día)	11.6726,400	13.2624,000	16.5628,800	17.2540,800

Tabla A.7. Extracción de agua por fuente Ministro Hales. Consejo Minero, 2021.

Faena	Fuente	2016	2017	2018	2019
Ministro Hales	Superficial (m ³ /s)	-	-	-	-
	Subterránea (m ³ /s)	0,237	0,207	0,181	0,064
	Mina (m ³ /s)	0,040	0,045	0,040	0,034
	Mar No Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Terceros (m ³ /s)	0,145	0,193	0,183	0,280
	Total (m ³ /s)	0,422	0,445	0,404	0,378
	Total (m ³ /día)	36.460,800	38.448,000	34.905,600	32.659,200

Tabla A.8. Extracción de agua por fuente Antucoya. Consejo Minero, 2021.

Faena	Fuente	2016	2017	2018	2019
Antucoya	Superficial (m ³ /s)	-	-	-	-
	Subterránea (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mina (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar No Desalada (m ³ /s)	0,188	0,200	0,188	0,178
	Mar Desalada (m ³ /s)	-	0,010	0,045	0,043
	Terceros (m ³ /s)	-	-	-	-
	Total (m ³ /s)	0,188	0,210	0,233	0,221
	Total (m ³ /día)	16.243,200	18.144,000	20.131,200	19.094,400

Tabla A.9. Extracción de agua por fuente Spence. Consejo Minero, 2021.

Faena	Fuente	2016	2017	2018	2019
Spence	Superficial (m ³ /s)	-	-	-	-
	Subterránea (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mina (m ³ /s)	-	-	-	0,016
	Mar No Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Terceros (m ³ /s)	0,204	0,199	0,195	0,208
	Total (m ³ /s)	0,204	0,199	0,195	0,224
	Total (m ³ /día)	17.625,600	17.193,600	16.848,000	19.353,600

Tabla A.10. Extracción de agua por fuente Sierra Gorda. Consejo Minero, 2021.

Faena	Fuente	2016	2017	2018	2019
Sierra Gorda	Superficial (m ³ /s)	-	-	-	-
	Subterránea (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mina (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar No Desalada (m ³ /s)	0,648	0,648	0,877	0,809
	Mar Desalada (m ³ /s)	0,070	0,070	-	-
	Terceros (m ³ /s)	0,030	0,031	0,030	0,030
	Total (m ³ /s)	0,748	0,749	0,907	0,839
	Total (m ³ /día)	64.627,200	64.713,600	78.364,800	72.489,600

Tabla A.11. Extracción de agua por fuente Centinela. Consejo Minero, 2021.

Faena	Fuente	2016	2017	2018	2019
Centinela	Superficial (m ³ /s)	-	-	-	-
	Subterránea (m ³ /s)	0,092	0,063	0,062	0,069
	Mina (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar No Desalada (m ³ /s)	0,880	0,919	0,918	0,895
	Mar Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Terceros (m ³ /s)	-	-	0,030	0,010
	Total (m ³ /s)	0,972	0,982	1,010	0,974
	Total (m ³ /día)	83.980,800	84.844,800	87.264,000	84.153,600

Tabla A.12. Extracción de agua por fuente Gabriela Mistral. Consejo Minero, 2021.

Faena	Fuente	2016	2017	2018	2019
Gabriela Mistral	Superficial (m ³ /s)	-	-	-	-
	Subterránea (m ³ /s)	0,208	0,236	0,210	0,218
	Mina (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar No Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Terceros (m ³ /s)	-	-	-	-
	Total (m ³ /s)	0,208	0,236	0,210	0,218
	Total (m ³ /día)	17.971,200	20.390,400	18.144,000	18.835,200

Tabla A.13. Extracción de agua por fuente Lomas Bayas. Consejo Minero, 2021.

Faena	Fuente	2016	2017	2018	2019
Lomas Bayas	Superficial (m ³ /s)	0,151	0,151	0,157	-
	Subterránea (m ³ /s)	0,022	0,022	0,020	-
	Mina (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar No Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Terceros (m ³ /s)	-	-	0,018	-
	Total (m ³ /s)	0,173	0,173	0,195	-
	Total (m ³ /día)	14.947,200	14.947,200	16.848,000	-

Tabla A.14. Extracción de agua por fuente Zaldívar. Consejo Minero, 2021.

Faena	Fuente	2016	2017	2018	2019
Zaldívar	Superficial (m ³ /s)	-	-	-	-
	Subterránea (m ³ /s)	0,200	0,211	0,210	0,212
	Mina (m ³ /s)	0,012	0,011	0,020	-
	Mar No Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Terceros (m ³ /s)	-	-	-	-
	Total (m ³ /s)	0,212	0,222	0,230	0,212
	Total (m ³ /día)	18316,800	19180,800	19828,800	18316,800

Tabla A.15. Extracción de agua por fuente Escondida. Consejo Minero, 2021.

Faena	Fuente	2016	2017	2018	2019
Escondida	Superficial (m ³ /s)	-	-	-	-
	Subterránea (m ³ /s)	1,664	1,208	1,344	1,308
	Mina (m ³ /s)	0,222	0,169	0,179	0,143
	Mar No Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar Desalada (m ³ /s)	0,371	0,974	1,735	1,757
	Terceros (m ³ /s)	-	-	-	-
	Total (m ³ /s)	2,257	2,351	3,258	3,208
	Total (m ³ /día)	19.5004,800	20.3126,400	28.1491,200	27.7171,200

Tabla A.16. Extracción de agua por fuente El Salvador. Consejo Minero, 2021.

Faena	Fuente	2016	2017	2018	2019
El Salvador	Superficial (m ³ /s)	0,603	0,603	0,590	0,516
	Subterránea (m ³ /s)	0,165	0,165	0,123	0,075
	Mina (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar No Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Terceros (m ³ /s)	-	-	-	-
	Total (m ³ /s)	0,768	0,768	0,713	0,591
	Total (m ³ /día)	66.355,200	66.355,200	61.603,200	51.062,400

Tabla A.17. Extracción de agua por fuente Candelaria. Consejo Minero, 2021.

Faena	Fuente	2016	2017	2018	2019
Candelaria	Superficial (m ³ /s)	-	-	-	-
	Subterránea (m ³ /s)	0,003	0,003	-	-
	Mina (m ³ /s)	-	-	0,005	-
	Mar No Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar Desalada (m ³ /s)	0,251	0,251	0,249	0,245
	Terceros (m ³ /s)	0,133	0,133	0,104	0,026
	Total (m ³ /s)	0,387	0,387	0,358	0,271
	Total (m ³ /día)	33.436,800	33.436,800	30.931,200	23.414,400

Tabla A.18. Extracción de agua por fuente Caserones. Consejo Minero, 2021.

Faena	Fuente	2016	2017	2018	2019
Caserones	Superficial (m ³ /s)	-	-	-	-
	Subterránea (m ³ /s)	0,138	0,138	0,173	0,273
	Mina (m ³ /s)	0,018	0,018	0,011	0,004
	Mar No Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Terceros (m ³ /s)	-	-	-	-
	Total (m ³ /s)	0,156	0,156	0,184	0,277
	Total (m ³ /día)	13.478,400	13.478,400	15.897,600	23.932,800

Tabla A.19. Extracción de agua por fuente Carmen de Andacollo. Consejo Minero, 2021.

Faena	Fuente	2016	2017	2018	2019
Carmen Andacollo	Superficial (m ³ /s)	0,006	0,030	0,004	-
	Subterránea (m ³ /s)	0,310	0,339	0,301	0,266
	Mina (m ³ /s)	0,042	0,059	0,050	0,046
	Mar No Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Terceros (m ³ /s)	-	-	-	-
	Total (m ³ /s)	0,358	0,428	0,355	0,312
	Total (m ³ /día)	30.931,200	36.979,200	30.672,000	26.956,800

Tabla A.20. Extracción de agua por fuente Los Pelambres. Consejo Minero, 2021.

Faena	Fuente	2016	2017	2018	2019
Los Pelambres	Superficial (m ³ /s)	0,580	0,583	0,572	0,408
	Subterránea (m ³ /s)	0,017	0,037	0,080	0,083
	Mina (m ³ /s)	0,175	0,199	0,154	0,117
	Mar No Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Terceros (m ³ /s)	-	-	-	0,0003
	Total (m ³ /s)	0,772	0,819	0,806	0,608
	Total (m ³ /día)	66.700,800	70.761,600	69.638,400	52.557,120

Tabla A.21. Extracción de agua por fuente El Soldado. Consejo Minero, 2021.

Faena	Fuente	2016	2017	2018	2019
El Soldado	Superficial (m ³ /s)	0,024	0,046	0,025	0,005
	Subterránea (m ³ /s)	0,096	0,138	0,071	0,108
	Mina (m ³ /s)	0,015	0,034	0,007	0,025
	Mar No Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Terceros (m ³ /s)	-	-	-	-
	Total (m ³ /s)	0,135	0,218	0,103	0,138
	Total (m ³ /día)	11.664,000	18.835,200	8.899,200	11.923,200

Tabla A.22. Extracción de agua por fuente Andina. Consejo Minero, 2021.

Faena	Fuentes	2016	2017	2018	2019
Andina	Superficial (m ³ /s)	0,670	0,581	0,416	0,452
	Subterránea (m ³ /s)	0,094	0,101	0,206	0,199
	Mina (m ³ /s)	0,255	0,246	0,230	0,183
	Mar No Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Terceros (m ³ /s)	-	-	-	-
	Total (m ³ /s)	1,019	0,928	0,852	0,834
	Total (m ³ /día)	88.041,600	80.179,200	73.612,800	72.057,600

Tabla A.23. Extracción de agua por fuente Los Bronces. Consejo Minero, 2021.

Faena	Fuentes	2016	2017	2018	2019
Los Bronces	Superficial (m ³ /s)	0,743	0,787	0,548	0,186
	Subterránea (m ³ /s)	0,020	0,016	0,029	0,017
	Mina (m ³ /s)	0,142	0,111	0,177	0,115
	Mar No Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Terceros (m ³ /s)	0,074	0,050	0,051	0,018
	Total (m ³ /s)	0,979	0,964	0,805	0,336
	Total (m ³ /día)	84.585,600	83.289,600	69.552,000	29.030,400

Tabla A.24. Extracción de agua por fuente El Teniente. Consejo Minero, 2021.

Faena	Fuentes	2016	2017	2018	2019
El Teniente	Superficial (m ³ /s)	1,252	1,305	1,460	1,353
	Subterránea (m ³ /s)	0,017	0,006	0,011	-
	Mina (m ³ /s)	0,268	0,244	0,201	0,284
	Mar No Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Mar Desalada (m ³ /s)	-	-	-	-
	Terceros (m ³ /s)	-	-	-	-
	Total (m ³ /s)	1,537	1,555	1,672	1,637
	Total (m ³ /día)	132.796,800	134.352,000	144.460,800	141.436,800

Anexo B

Tabla B.1. Capacidad instalada de tratamiento de minerales vía lixiviación y flotación, macrozona Norte. SERNAGEOMIN, 2020a.

Nombre de planta de beneficio	Tipo de planta	Capacidad total diaria de tratamiento (tm/día)	Capacidad diaria de tratamiento por flotación (tm/día)	Capacidad diaria de tratamiento por lixiviación (tm/día)
Cerro Colorado	Lixiviación	71.644	-	71.644
Teck Quebrada Blanca	Lixiviación	30.000	-	30.000
Doña Inés de Collahuasi	Flotación	177.314	177.314	-
CODELCO Chile - Div. Chuquicamata	Flotación/Lixiviación	354.899	226.199	128.700
CODELCO Chile - Div. Radomiro Tomic	Lixiviación	180.000	-	180.000
Lomas Bayas	Lixiviación	158.782	-	158.782
Zaldívar	Flotación/Lixiviación	74.500	4.500	70.000
Centinela - Sulfuros y Óxidos	Flotación/Lixiviación	128.767	100.000	28.767
Sierra Gorda	Flotación	110.000	110.000	-
Antucoya	Lixiviación	100.000	-	100.000
Escondida.	Flotación/Lixiviación	476.221	245.055	231.166
El Abra	Lixiviación	125.894	-	125.894
Spence	Lixiviación	60.000	-	60.000
CODELCO Chile - Div. Ministro Hales	Flotación	50.000	50.000	-
CODELCO Chile - Div. Gabriela Mistral	Lixiviación	128.625	-	128.625
Planta Candelaria	Flotación	69.408	69.408	-
CODELCO Chile - Div. Salvador	Flotación/Lixiviación	47.000	32.000	15.000
Caserones	Flotación/Lixiviación	99.229	92.039	7.190
Los Pelambres Planta Concentradora	Flotación	175.000	175.000	-
Carmen de Andacollo - Flotación y Lixiviación	Flotación/Lixiviación	120.400	110.400	10.000

Tabla B.2. Capacidad instalada de tratamiento de minerales vía lixiviación y flotación, macrozona Centro. SERNAGEOMIN, 2020a.

Nombre de planta de beneficio	Tipo de planta	Capacidad total diaria de tratamiento (tm/día)	Capacidad diaria de tratamiento por flotación (tm/día)	Capacidad diaria de tratamiento por lixiviación (tm/día)
CODELCO Chile - Div. Andina - Planta Flotación	Flotación	92.000	92.000	-
Anglo American Sur - División El Soldado - Planta Sulfuro/Flotación	Flotación	22.500	22.500	-
Anglo American Sur - Planta Las Tórtolas	Flotación	150.000	150.000	-
CODELCO Chile - Div. El Teniente - Planta Colón	Flotación	144.000	144.000	-



Anexo C

Tabla C.1. Cartera de proyectos 2019 - 2030 para faenas consideradas en este estudio. COCHILCO 2019; 2020; 2021.

(**) Capacidad de producción referencial de Cu en t en base a antecedentes públicos, correspondiente al máximo alcanzable por la operación y no a un estimativo de producción constante.

(*) Corresponde al máximo a alcanzar de operaciones que permitirán continuidad operacional y no necesariamente al aporte adicional a las operaciones existentes.

(+) Iniciativas de expansión de proyectos existentes. Resto de los proyectos sin signo (+) corresponde a iniciativas nuevas o de reposición.

Proyecto	Condición	Año	Año probable	Cu (t)** año	Cu (t) año	Cu (t) día	Capacidad de tratamiento (t/día)	Tipo producto
Collahuasi Inst. Comp. 170 ktpd	Base	2023	2023	+380.000	380.000	1041	37.000	Cu en concentrado
Quebrada Blanca Hipógeno	Base	2023	2023	270.000	270.000	740	135.000	Cu en concentrado
Collahuasi Mej. Cap. Prod. 210 ktpd	Posible	2025	2030	+140.000	140.000	384	40.000	Cu en concentrado y cátodos SxEw
Spence Growth Option	Base	2022	2022	198.000	198.000	542	97.500	Cu en concentrado
Cont. Operacional Zaldívar*	Probable	2022	2024	126.000*	126.000	345	260.000	Cátodos SxEw
Sierra Gorda Expansión 230 ktpd	Probable	2024	2026	+120.000	120.000	329	40.000	Cu en concentrado
Polo Sur	Probable	2024	2026	70.000*	70.000	192	Reposición	Cátodos SxEw
Desarrollo Distrito Centinela	Probable	2025	2027	270.000	270.000	740	95.000	Cu en concentrado
Sulfuros Rt Fase II	Posible	2026	2031	250.000	250.000	685	200.000	Cu en concentrado
Conc. El Abra (Ex. El Abra Mill)	Potencial	2028	2035	300.000	300.000	822	150.000	Cu en concentrado
Lomas Bayas 2034	Posible	2024	2029	+85.000	85.000	233	170.000 total	Cátodos SxEw
Cont. Op. Minera Candelaria	Probable	2025	2027	110.000*	110.000	301	90.000	Cu en concentrado
Rajo Inca*	Base	2022	2022	+70.000*	70.000	192	37.000 sulfuros y 30.000 oxidados total	Cu en concentrado y cátodos SxEw
Cont. Operacional Carmen de Andacollo	Base	2023	2023	60.000*	60.000	164	Aumento de un 4%	Cu en concentrado y cátodos SxEw
Amp. Mg. Los Pelambres Fase I	Base	2022	2022	+66.000	66.000	181	20.000	Cu en concentrado
Los Pelambres Futuro II	Posible	2026	2031	+35.000	35.000	96	15.000	Cu en concentrado
Los Bronces Integrado*	Probable	2024	2026	380.000*	380.000	1041	180.000	Cu en concentrado
Nuevo Nivel Mina*	Base	2023	2023	330.000*	330.000	904	137.000	Cu en concentrado

Anexo D

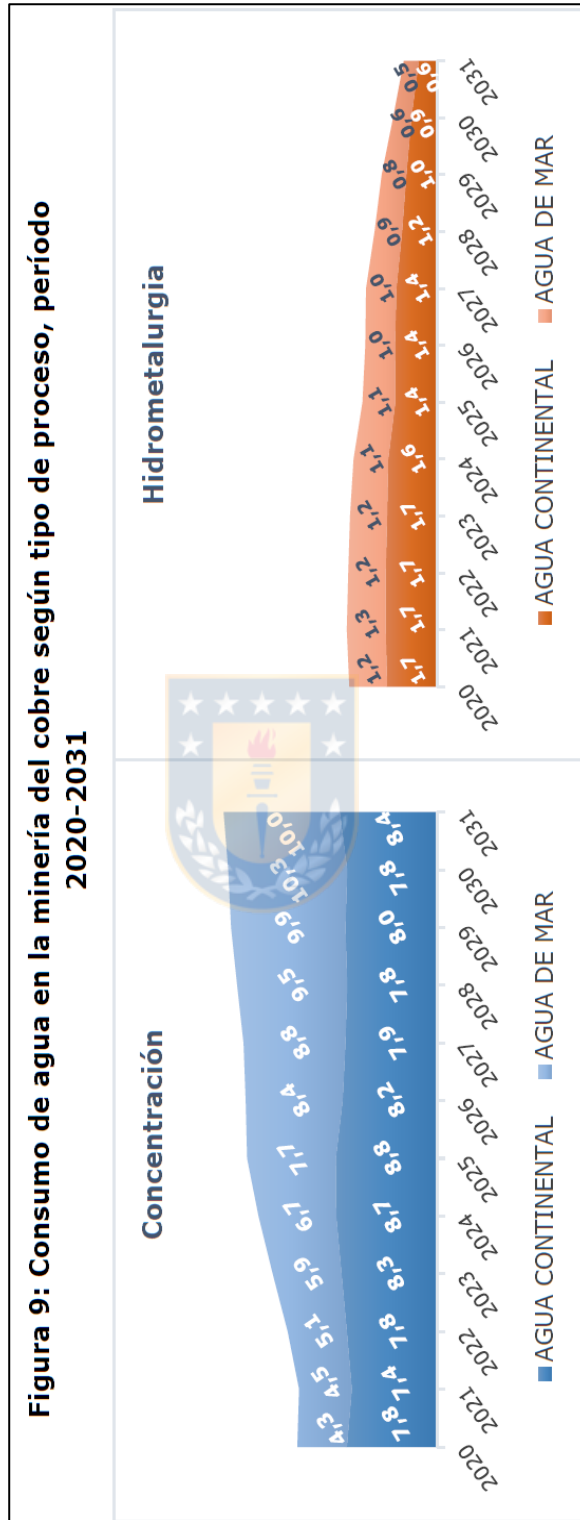


Figura D.1. Proyección consumo de agua en la minería del Cu período 2020 - 2031. COCHILCO 2020c.